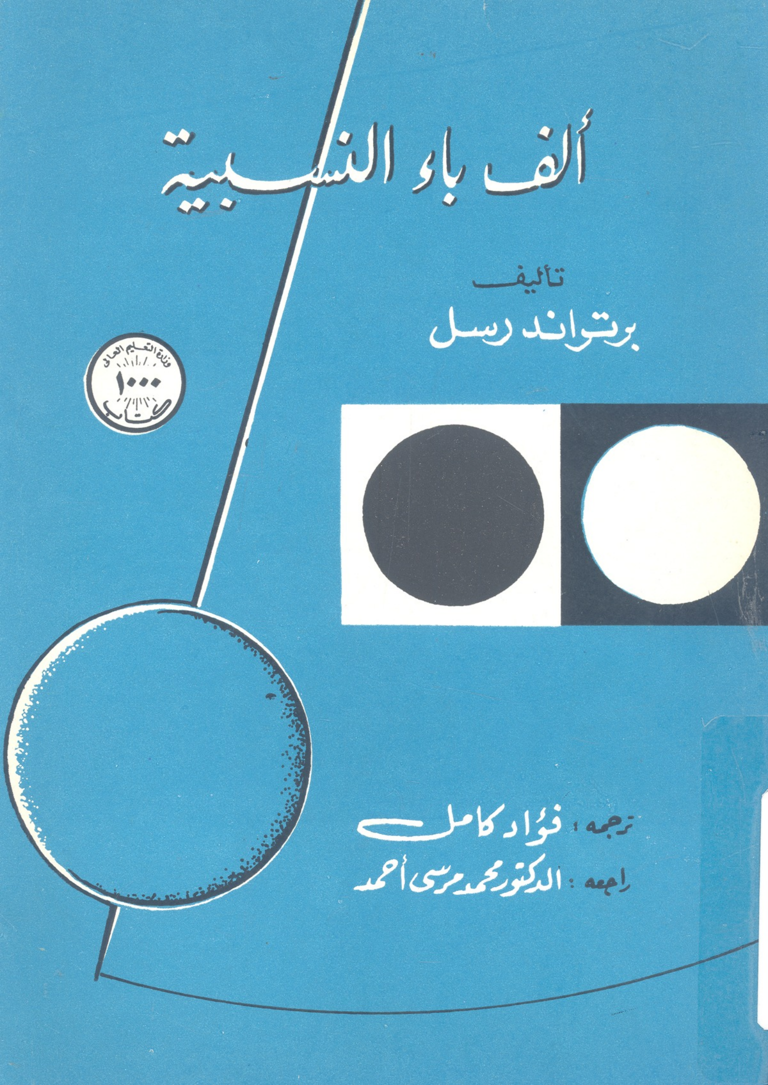

ألف باء النسبية
تأليف
برتراند رسل
وزارة التعليم العالى
١٠٠٠
كتاب
ترجمه : فؤاد كامل
راجعه : الدكتور محمد مرسى أحمد

الألف كتاب (٥٧٢)

ألِفْ باء النسبيّة

تأليف

برتراند رسل

ترجمة

فؤاد كامل

مراجعة

الدكتور محمد مرسي أحمد

الناشر مركز كتب الشرق الأوسط

١٩٦٥

دار الثقافة العربية للطباعة
عابدين . ت ٩٦٧٩٩

الفصل الأول

اللمس والنظر : الأرض والسماء

يعرف الناس جميعاً أن « أينشتين » قد أتى عملا مثيراً للدهشة ، غير أن عدداً قليلا جداً من الناس هو الذى يعرف على وجه الدقة ما أتاه « أينشتين » . من المعروف عامة أنه أحدث ثورة فى تصوراتنا عن العالم الفزيائى ، غير أن تلك التصورات الجديدة مغلفة بالمصطلحات الرياضية البحتة . ومن الحق أن هناك تفسيرات مبسطة لاحصر لها لنظرية النسبية ، ولكنها تتأبى عامة على الوضوح حين تشرع فى قول شىء هام . ولاتثريب فى هذا على المؤلفين ، فإن كثيراً من الأفكار الجديدة يمكن أن نعبر عنها فى لغة لارياضية ، ومع ذلك ، فإن صعوبتها تأتى من هذه الناحية . إن مانحتاج إليه هو تغيير فى الصورة التى نتخيلها للعالم . . تلك الصورة التى انتقلت إلينا عن أسلاف بعداء — بل لعلهم كانوا أسلافاً عاشوا فى عصور سابقة على الإنسانية — فتعلمها كل واحد منا فى طفولته المبكرة . وتغيير خيالنا أمر عسير دائماً ، ولا سيما بعد أن نشب عن الطوق . وهذا الضرب عينه من التغيير هو الذى كان ينشده « كوبرنيكوس » حين نادى بأن الأرض ليست ثابتة ، وأن السماء لاتدور حولها مرة كل يوم . وهذه الفكرة لا تنطوى الآن — فى نظرنا — على أية مشقة ، لأننا تعلمناها قبل أن تتجمد عادتنا العقلية . وبالمثل ، سوف تبدى أفكار « أينشتين » أسهل بالنسبة للأجيال التى تنمو فى وقت واحد مع انتشار هذه الأفكار ، غير أنه لامناص بالنسبة لنا من أن نبذل مجهوداً معيناً فى إعادة بناء خيالنا .

ونحن حين نستكشف سطح الأرض ، نستخدم حواسنا جميعاً ، وعلى الأخص حاستى اللمس والنظر . وقد كان الناس فى العصور السابقة على العلم يستخدمون أجزاء من الجسم فى قياس الأطوال ، وبهذه الطريقة أمكن تحديد « القدم » و « الذراع » و « الشبر » . وفى المسافات الطويلة ، نفكر فى الزمن الذي يستغرقه السير من مكان إلى آخر . كما تعلمنا تدريجيا أن نحكم على المسافة

حكما تقريبيا بمجرد النظر ، ولكننا نعتمد على اللمس إذا تحرينا الدقة . وفضلا عن ذلك ، فإن اللمس هو الذى يمنحنا الإحساس « بالواقـــع » . وثمة أشياء لانستطيـع لمسها مثل أقواس قزح ، والانعكاسات التى تظهر فى المرايا .. وهلم جرا . وهذه الأشياء تبعث بالحيرة فى نفوس الأطفال الذين تعطل تأملاتهم الميتافيزيقية معرفتهم بأن مايوجد فى المرآة ليس « حقيقياً » .. وقد كان خنجر مكبث غير حقيق ، لأنه لم يكن « محسوساً » بالنسبة للمس كما هو محسوس بالنسبة للنظر » . ولاتقوم الهندسة والفزياء وحدهما على حاسة اللمس ، بل إن تصورنا كله لما يوجد خارجنا يقوم على هذه الحاسة ، وإننا لنضع ذلك فى استعارتنا فنقول عن خطبة جيدة إنها متماسكة ، ونقول عن خطبة رديئة إنها « هواء » لأننا نشعر أن « الهواء » ليس « واقعياً » تماماً .

وحين ندرس السماء ، نحرم من حواسنا جميعاً ، فلا تتبقى لنا سوى حاسة النظر . فنحن لانستطيـع أن نلمس الشمس ، أو أن نسافر إليها ، كما لا نستطيـع أن نطوف بالقمر ، أو أن نقيس « الثريا » بمسطرة . ومع ذلك فإن الفلكيين قد استخدموا — بلا تردد — الهندسة والفزياء اللذين انتفعا بهما على سطح الأرض واللذين أقاموهما على اللمس والسفر وبهذه الفعلة جلبوا على رءوسهم المتاعب التى تركوها لأينشتين كى يقوم بالتخلص منها ، واتضح أن كثيراً مما تعلمناه عن طريق حاسة اللمس ماهو إلا تحيزات لاعلمية ، ينبغى أن ننبذها إذا أردنا أن تكون لدينا صورة حقيقية عن العالم .

وهذا مثل قد يساعدنا على أن نفهم مدى الاستحالة التى يلاقيها الفلكى إذا قيس بالرجل الذى يقتصر اهتمامه على الأشياء الموجودة فوق سطح الأرض . فلنفترض أن جرعة ماقد أعطيت لك لكى تغيب مؤقتا عن وعيك ، فإذا استيقظت وجدت نفسك فاقداً لذاكرتك دون أن تفقد قواك المفكرة . ولنمعن أكثر من ذلك فى الافتراض ، فنفترض أنك قد حملت أثناء غيبوبتك فى بالون ، وهذا البالون بعد أن عدت إلى وعيك — ينساب مع الريح فى ليلة ظلماء هى ليلة اليوم الخامس من نوفمبر إذا كنت فى إنجلترا ، أو الرابع من يوليو إذا كنت فى أمريكا ، وأنك تستطيـع أن تشاهد الصواريخ التى تطلق من الأرض : من القطارات ، ومن الطائرات التى تسافر فى كافة الاتجاهات . ولكنك لاتستطيـع

ان ترى الأرض أو القطارات أو الطائرات بسبب الظلمة . فما نوع الصورة التى ستكونها عن العالم ؟ سوف تعتقد أن لاشيء دائم : فليست هناك سوى ومضات قصار من الضوء ، تنتقل أثناء وجودها القصير — خلال الفراغ فى منحنيات شديدة التباين والغرابة . وأنت لاتستطيع أن تلمس تلك الومضات من الضوء ، كل ماتستطيعه هو أن تراها . ومن الواضح أن هندستك وفزياءك وميتافيزيقاك ستكون مختلفة تمام الاختلاف عن البشر العاديين . وإذا كان معك فى البالون إنسان عادى ، فسوف نجد أنه يجمجم بكلام غير مفهوم . أما إذا كان معك أينشتين فسوف تفهمه على نحو أسهل كثيراً مما يفهمه الإنسان العادى ، لأنك ستكون حينذاك متحرراً من طائفة من التصورات المسبقة التى تمنع معظم الناس عن فهم مايقول .

وتعتمد نظرية النسبية إلى حد كبير على التخلص من المفاهيم التى تعد نافعة فى الحياة العادية ، ولكنها ليست كذلك بالنسبة لمسافر البالون الواقع تحت تأثير المخدر . ذلك أن الظروف التى تنشأ على سطح الأرض توحى ، لأسباب عرضية متعددة — بتصورات تتبين فيما بعد أنها غير دقيقة ، وإن أصبحت تبدو كأنها ضرورات للفكر . وأهم تلك الظروف أن معظم الأشياء على سطح الأرض دائمة دواماً معقولا ، وتكاد تكون ثابتة من وجهة نظر أرضية ، ولو لم يكن هذا هو حالها ، لما بدت فكرة القيام برحلة محددة على النحو الذى تبدو عليه فعلا . فإنك إذا أردت أن تسافر من « كنجز كروس » إلى إدنبرة ، فأنت تعلم أنك ستجد « كنجز كروس » حيث كانت دائماً ، وأن الخط الحديدى سيسلك نفس الطريق الذى اتبعه حين قمت برحلتك الأخيرة ، وأن محطة « ويفرلى » بأدنبرة لن تكون قد انتقلت إلى « القلعة » . ومن ثم فإنك تقول وتعتقد أنك سافرت إلى إدنبرة ، لا أن إدنبرة هى التى سافرت إليك ، وإن كانت العبارة الأخيرة لاتقل من حيث الدقة عن الأولى . ونجاح هذه النظرة التى تستقيم مع الفطرة السليمة تعتمد على مجموعة من الأشياء تدخل حقاً فى باب الحظ . فلنفترض أن منازل لندن تتحرك حركة دائمة كسرب من النحل ، ولنفترض أن خطوط السكك الحديدية تتحرك وتغير أشكالها كالسيول ، وانفترض أخيراً أن الأشياء المادية تتشكل باستمرار وتتحلل كالسحب . هذه جميعاً افتراضات لاتنطوى على شيء من الاستحالة ، ولكن من

الواضح أن ما نسميه رحلة إلى إدنبرة لن يكون له معنى فى مثل هذا العالم . وستبدا بلاشك بأن تسأل سائق التاكسى . «أين يوجد كنجز كروس هذا الصباح ؟» ولن تجد بدا — فى المحطة — من أن تسأل سؤالا مماثلا عن إدنبرة ، غير أن عامل التذاكر سيجيب عليك قائلا: «أى جزء من إدنبره تعنيه ياسيدى؟ إن شارع البرنس (الأمير) قد ذهب إلى جلاسجو ، والقلعة قد صعدت إلى الجبال (الهايلاندز) ، ومحطة ويفرلى موجودة الآن تحت الماء وسط « فيرث فورث » . وفى أثناء الرحلة ، لن تبقى المحطات ساكنة إذ يكون بعضها راحلا إلى الشمال ، وبعضها الآخر إلى الجنوب أو الشرق أو الغرب ، وربما كانت رحلتها هذه أسرع كثيراً من القطار . فى مثل هذه الظروف لن تستطيع أن تقول أين أنت فى لحظة معينة . والواقع أن فكرة وجود الإنسان دائما فى « مكان » محدد ترجع إلى الثبات المحظوظ لمعظم الأشياء الكبيرة القائمة على سطح الأرض . ومافكرة « المكان » سوى تقريب عملى غليظ : إذ لاتتضمن شيئا ضرورياً من الوجهة المنطقية ، كما لا يمكن تحديدها تحديداً دقيقاً .

ولو أننا لم نكن أكبر كثيراً من الإلكترون ، لما كان لدينا ذلك الإحساس بالثبات الذى لا يرجع إلا إلى ماتتصف به حواسنا من غلظة ، وستكون «كنجز كروس» التى تبدو — انما صلبة — من الاتساع بحيث لا يستطيع أن يتصورها غير عدد قليل من علماء الرياضة الشواذ . وستكون القطع الصغيرة التى نستطيع أن نراها منها مؤلفة من نقط صغيرة غاية فى الصغر من المادة ، بحيث لا يتصل بعضها بالبعض الآخر أبدا ، بل تدور باستمرار الواحدة حول الأخرى فى رقصة من رقصات الباليه السريعة سرعة لاسبيل إلى تصورها . وسيكون عالم تجربتنا على قدر من الجنون يساوى ماعليه العالم الذى تسير فيه أجزاء إدنبرة المختلفة فى اتجاهات مختلفة . ولو أننا كنا — على سبيل التطرف المضاد — فى حجم الشمس ، وكانت أعمارنا طويلة كعمرها — فسوف نجد — ببطء مناظر فى الإدراك — كوناً مقلوبا رأساً على عقب لا يعرف الدوام — النجوم والكواكب فيه تغدو وتذهب كغمامات الصباح ، ولن يبقى ثمة شىء فى مركز ثابت بالنسبة لأى شىء آخر . وهكذا ترجع فكرة الثبات المقارن التى تؤلف جزءاً من نظرتنا العادية إلى تلك الحقيقة ؛ وهى أننا بالحجم الذى نحن عليه ، وإلى

أننا نعيش على كوكب سطحه غير مرتفع الحرارة ارتفاعاً كبيراً . ولو لم تكن هذه حالنا لما وجدنا الفزياء السابقة على النسبية مرضية من الناحية العقلية . وما كنا اخترعنا مثل هذه النظريات بكل تأكيد ، ولتوصلنا إلى الفزياء النسبية فى وثبة واحدة ، أو ظللنا جاهلين بالقوانين العملية . ومن حسن حظنا أننا لم نواجه الاختيار بين أحد هذين الأمرين ، مادام يكاد يكون من غير المتصور أن يقوم رجل واحد بما قام به إقليدس وجاليليو ونيوتن وأينشتين . ومع ذلك فمن الصعب — بدون هذه العبقرية الخارقة — أن يكون من المتعذر اكتشاف الفزياء فى عالم يبدو فيه التدفق flux الشامل واضحاً للملاحظة غير العلمية .

وفى علم الفلك ، على الرغم من أن الشمس والقمر والنجوم تواصل وجودها عاما بعد عام ، فإن العالم — الذى يجب أن نتناوله — مختلف من جوانب أخرى عن عالم الحياة اليومية ، اختلافاً شديداً . فنحن نعتمد — كما سبق أن لاحظنا — على حاسة النظر وحدها : إذ لانستطيع أن نلمس الأجرام السماوية أو أن نسمعها أو أن نشمها أو أن نتذوقها . وكل شىء فى السماء يتحرك بالنسبة لكل ماعداه . الأرض تدور حول الشمس ، والشمس تتحرك أسرع كثيراً من القطار السريع صوب نقطة فى برج هرقل ، والنجوم « الثابتة » تمرق هنا وهناك كمجموعة من الدجاجات المذعورة . ولا وجود فى السماء لأماكن مميزة كمحطة « كنجز كروس » أو إدنبرة . وعند ماتسافر على الأرض من مكان إلى مكان ، تقول إن القطار يتحرك لا المحطات ، لأن المحطات تحافظ على علاقاتها الطبوغرافية (المكانية) إحداها بالأخرى ، وبالبلاد المحيطة بها . أما فى علم الفلك فإنه من التعسف أن تحدد أيهما القطار وأيهما المحطة : ولا تتحدد هذه المسألة إلا بالاتفاق البحت ولمجرد الاصطلاح .

ومن الطريف ، فى هذا المجال — أن نضع « أينشتين » فى مقابل « كوبرنيكس » فقد كان الناس يعتقدون قبل كوبرنيكس أن الأرض ساكنة ، وأن السماء تدور حولها مرة كل يوم — وذهب « كوبرنيكس » إلى أن الأرض تدور « حقاً » مرة كل يوم . وأن الدوران اليومى للشمس والنجوم دوران « ظاهرى » فحسب . وتبنى جاليليو ونيوتن هذا الرأى ، وكان من المعتقد أن هناك أشياء كثيرة

تثبته ، مثل تفلطح الأرض عند القطبين ، وأن الأجسام أثقل هناك منها عند خط الاستواء . أما فى النظرية الحديثة فإن الخلاف بين كوبرنيكس وأسلافه مجرد اختلاف اصطلاحى ، فكل حركة نسبية ، ولا خلاف هناك بين القضيتين : « الأرض تدور مرة كل يوم » و « السماء تدور حول الأرض مرة كل يوم » . هاتان القضيتان تعنيان شيئاً واحداً بعينه ، تماماً مثلما أقول إن شيئاً معينا طوله ست أقدام أو ياردتان . وعلم الفلك أيسر إذا أخذنا الشمس على أنها ثابتة بدلا من الأرض ، كالحسابات تكون أسهل بالعملة العشرية . أما أن يقول المرء شيئاً أكثر من ذلك عن كوبرنيكس فهذا معناه افتراض الحركة المطلقة وهذا وهم . كل حركة نسبية والنظر إلى جسم ما بوصفه ثابتاً ، مجرد اتفاق ، وكل هذه الاتفاقات مشروعة على حد سواء ، وإن لم تكن جميعاً على درجة واحدة من السهولة .

ثم مسألة أخرى على جانب عظيم من الأهمية يختلف فيها الفلك عن الفزياء الأرضية لاعتماده اعتماداً مقصوراً على البصر : استخدام كل من التفكير الشعبي والفزياء العتيقة فكرة « القوة » التى بدت واضحة لأنها كانت مرتبطة بالإحساسات المألوفة ، فنحن حين نسير ، نشعر بإحساسات ترتبط بعضلاتنا ، وهذه الإحساسات لانشعر بها حين نجلس ساكنين . وفى العصور السابقة على السحب الميكانيكى ، وعلى الرغم من أن الناس كانوا يستطيعون السفر وهم جلوس فى عرباتهم ، فإنهم كانوا يستطيعون أن يشاهدوا — فى وضوح — الجياد تجهد نفسها ، وتبذل « قوتها » بنفس الطريقة التى يبذل بها الناس قواهم . وكل إنسان يعرف بالخبرة مايعنيه الدفع أو الجر ، وما يعنيه أن يدفع وأن يجر . وهذه الحقائق المألوفة للغاية جعلت « القوة » تبدو أساساً طبيعياً لعلم الديناميكا . غير أن قانون نيوتن للجاذبية أقام عقبة فى هذا السبيل ، فالقوة الموجودة بين كرتين من كرات البلياردو تبدو مفهومة لأننا نعرف مايعنيه الاصطدام بشخص آخر ، أما القوة الموجودة بين الأرض والشمس التى تبعد عنها ثلاثة وتسعين مليوناً من الأميال فأمرها غامض . وقد رأى نيوتن نفسه أن « الفعل على البعد » مستحيل ، ومن ثم فقد اعتقد أن هناك نظاماً آليا لم يكتشف بعد ، يجعل تأثير الشمس ينتقل إلى الكواكب . وأيا كان الأمر ، فإن مثل هذا النظام الآلى لى

يكتشف ، وظلت الجاذبية لغزاً . والحقيقة هى أن تصور « القوة » برمته تصور خاطىء . والشمس لاتمارس أية قوة على الكواكب ، وفى قانون أينشتين للجاذبية ، كل مايفعله الكوكب هو أنه ينتبه إلى مايجده فى المناطق المجاورة له . أما كيف يتم هذا الانتباه فسوف نشرحه فى فصل آخر ، وأما الآن فنحن مهتمون بضرورة التخلى عن فكرة « القوة » التى ترجع إلى التصورات المضللة المستمدة من حاسة اللمس .

وكلما تقدمت الفزياء ، بدا من الواضح أكثر فأكثر أن النظر أقل تضليلا من اللمس بوصفه مصدراً للأفكار الأساسية التى نكونها عن المادة . والبساطة الظاهرة فى اصطدام كرات البلياردو بساطة وهمية تماماً . والواقع أن كرتى البلياردو لاتتلامسان قط ، ومايحدث حقاً معقد بصورة لا سبيل إلى تصورها ، ولكنه أشبه بما يحدث حين ينفذ شهاب إلى النظام الشمسى ويخرج منه ثانية ، منه بما يفترض الحس العام حدوثه .

إن معظم ماقلناه آنفاً ، قد عرفه علماء الطبيعة فعلا قبل أن يخترع أينشتين نظرية النسبية . فقد كان من المعروف أن « القوة » مجرد وهم رياضى ، كما كان من المعتقد أن الحركة مجرد ظاهرة نسبية ، أى أنه حين يغير جسمان موضعهما النسبى فإننا لانستطيع أن نقول إن أحدهما يتحرك ، بينما الآخر ثابت ، مادامت الحادثة مجرد تغير فى علاقة أحدهما بالآخر . غير أنه كان لابد من كدح عظيم حتى يمكن أن تنسجم عمليات الفزياء الفعلية مع هذه المعتقدات الجديدة . وكان نيوتن يعتقد فى القوة وفى المكان والزمان المطلقين ، وقد أدخل هذه المعتقدات فى مناهجه الفنية ، وظلت مناهجه هى المناهج التى يتبعها الفزيائيون الذين جاءوا بعده . أما أينشتين فقد اخترع منهجاً جديداً متحرراً من افتراضات نيوتن . ولكنه كان لابد له — لكى يفعل ذلك — من أن يغير الأفكار القديمة عن الزمان والمكان تغييراً أساسياً ، وهى أفكار لم يستطع أن يتحداها أحد منذ أزمنة سحيقة . وهنا تكمن صعوبة هذه النظرية وطرافتها . ولكن ، قبل شرحها ، ثمة تمهيدات أولية لاغنى عنها . وهذا هو موضوع الفصلين التاليين .

الفصل الثانى

مايحدث ومايشاهد

ثمة نمط معين من الأشخاص الممتازين كلف بتأكيد أن « كل شيء نسبي » وهذا ، بالطبع ، هراء ، لأنه إذا كان «كل شيء» نسبيا ، فلن يكون هناك «شيء» تصبح الأشياء نسبية إليه . ومهما يكن من أمر ، فمن الممكن أن نعتقد — دون الوقوع فى ضروب المحال الميتافيزيقية — أن كل شيء فى العالم الفزيائى نسبي لمشاهد ما . وهذا الرأى — سواء أكان صحيحاً أم لم يكن — ليس هو الرأى الذى تثبته « نظرية النسبية » . وربما كان الاسم غير موفق ، فمن المؤكد أنه قد أوقع الفلاسفة وغير المتعلمين فى ضروب من الخلط ، إذ يتخيلون أن النظرية الجديدة تثبت أن «كل شيء» فى العالم الفزيائى نسبي ، بينما الأمر على العكس من ذلك ، إذ تحرص هذه النظرية الجديدة حرصاً تاماعلى استبعاد كل ماهو نسبي ، والوصول إلى صيغة للقوانين الفزيائية لاتعتمد بحال من الأحوال على ظروف المشاهد . والحق أن هذه الظروف قد وجد أن لها تأثيراً على مايتبدى للشاهد ، تأثيراً أعظم مما كان يذهب إليه الفكر قبل ذلك ؛ غير أن أينشتين ، أوضح — فى الوقت نفسه — كيفية التخلص من هذا الأثر تخلصاً تاماً . وهذا هو مصدر كل مايبعث على الدهشة فى نظريته تقريباً .

حين يدرك اثنان من المشاهدين ماينظر على أنه حادث واحد ، يكون بين إدراكيهما تشابهات معينة ، واختلافات معينة أيضاً . أما الاختلافات فتطمسها مقتضيات الحياة اليومية ، لأنها تافهة من وجهة النظر العملية . غير أن علم النفس وعلم الفزياء مرغمان — كل من زاويته المختلفة عن الآخر — على تأكيد الجوانب التى يختلف فيها إدراك شخص لحادثة معطاة عن إدراك شخص آخر لهذه الحادثة نفسها . ويرجع بعض هذه الاختلافات إلى اختلافات فى أمخاخ أو عقول المشاهدين ، وقد يرجع بعضها إلى اختلافات فى أعضاء الحس ، أو إلى الموقف الفزيائى ، ويمكن أن نسمى هذه الأنواع الثلاثة على التوالى : النفسى ،

والفسيولوجى ، والفزيائى نحن نسمع ملاحظة ما إذا قيلت بلغة نعرفها ، على حين قد تمضى ملاحظة تقال بصوت مرتفع وبلغة لانعرفها — دون أن نفطن إليها قط . وإذا وقف رجلان على جبال الألب ، فقديدرك أحدهما جمال المنظر ، بينما يلاحظ الآخر مساقط المياه وكيفية الحصول على الطاقة منها : هذه اختلافات نفسية . أما الاختلافات بين رجل بعيد النظر ورجل قصير النظر أوبين رجل أصم ، ورجل مرهف السمع ، فهى اختلافات فسيولوجية . وهذان النوعان من الاختلافات لانهتم بهما ، ولم أذكرهما إلا لكى أستبعدهما . والنوع الذى يهمنا هو النوع الفزيائى البحت . والاختلافات الفزيائية بين مشاهدين تظل قائمة حين نستبدل المشاهدين بآلتين للتسجيل ، ومن الممكن إعادة إنتاجها فى فيلم أو على جراموفون. وإذا استمع رجلان إلى شخص ثالث يتحدث ، وكان أحدهما أقرب إلى المتحدث من الآخر ، فإن الأقرب سيستمع إلى أصوات أعلى وأسبق قليلا من الأصوات التى يسمعها الآخر . وإذا راقب رجلان شجرة تسقط ، فإن كلا منهما سيراها من زاوية مختلفة . وهذه الاختلافات تبينها آلات التسجيل نفس البيان . فهى ليست راجعة إلى انحرافات فى المشاهدين ، ولكنها جزء من المجرى العادى للطبيعة الفزيائية كما نخبرها .

ويعتقد الفزيائى — شأنه فى ذلك شأن الرجل العادى — أن إدراكاته الحسية تمنحه معرفة بما يحدث حقاً فى العالم الفزيائى ، لاعن تجاربه الخاصة فحسب . وهو ينظر إلى العالم الفزيائى — من وجهة نظر المهنة — على أنه «حقيقى» ، لابوصفه مجرد شىء تحلم به الكائنات الإنسانية . فكسوف الشمس — مثلا — يمكن أن يشاهده أى شخص إذا وقف فى مكان مناسب ، كما تشاهده أيضاً الألواح الفوتوغرافية المخصصة لهذا الغرض . والفزيائى مقتنع بأن شيئاً قد حدث حقاً يتجاوز تجربة أولئك الذين نظروا إلى الشمس أو إلى صور لها . ولقد ألححت على هذه النقطة التى قد تبدو واضحة وضوحاً لايحتاج إلى فضل بيان ، لأن بعض الناس يتخيلون أن أينشتين أحدث اختلافاً من هذه الناحية . والواقع أنه لم يأت بشىء من هذا القبيل .

ولكن إذا كان للفزيائى مايبرر اعتقاده فى أن عدداً من الناس يمكن أن

يشاهد « نفس » الحادث الفزيائى ، فمن الواضح إذن أن الفزيائى ينبغى أن تهتم بتلك السمات المشتركة فى الحادث بالنسبة للمشاهدين جميعاً ، لأن السمات الأخرى لا يمكن أن ينظر إليها بوصفها منتسبة للحادث نفسه . أو على الأقل ، ينبغى أن يقصر الفزيائى نفسه على السمات المشتركة للملاحظين الذين هم على « مستوى واحد من الصلاحية » . فالمشاهد الذى — يستخدم مجهراً أو منظاراً فلكياً مفضل على لمشاهد الذى لا يستخدم شيئاً ، ذلك لأنه يرى كل مايراه هذا الأخير ، وأكثر منه أيضاً . وقد « يرى » لوحاً فوتوغرافياً حساساً ، أكثر من ذلك ومن ثم فإنه مفضل على أية عين . أما الاختلافات الخاصة بالمنظور ، أو بالحجم الظاهرى التى ترجع إلى اختلاف المسافة ، فمن الواضح أنها لا ترجـــع إلى الشىء موضوع المشاهدة ، فهى تنتسب إلى وجهة نظر المشاهد فحسب . ويحذف الحس العام هذه الاختلافات فى حكمه على الأشياء ، وعلى الفزياء أن تمضى بهذه العملية نفسها إلى أبعد من ذلك كثيراً ، غير أن المبدأ واحد بعينه .

وأحب أن أوضح أننى لست مهتما بما يمكن أن يسمى عدم الدقة ، فأنا مهتم بالاختلافات الفزيائية الحقيقية بين الوقائع التى يعد كل منها وصفاً صحيحاً لحادثة معينة ، من وجهة نظرها الخاصة . فحين يطلق رجل مدفعاً ، فإن الأشخاص الذين ليسوا على مقربة منه تماماً ، يرون الومضة ، قبل أن يسمعوا صوت المدفع ، ولا يرجع هذا إلى أى عيب فى حواسهم ، وإنما إلى هذه الحقيقة وهى أن الصوت ينتقل انتقالا أبطأ من الضوء . والضوء ينتقل بسرعة إلى درجة يمكن معها — من وجهة نظر الظواهر الحادثة على ظهر الأرض — أن نعده فورياً . وكل ما يمكن أن نراه على الأرض يحدث — عملياً — فى اللحظة التى نراه فيها . وفى الثانية الواحدة يقطع الضوء ٣٠٠ر٠٠٠ كيلومتر (أى حوالى ١٨٦ر٠٠٠ ميل)، وهو ينتقل من الشمس إلى الأرض فى حوالى ثمانى دقائق ، ومن النجوم ما ينتقل ضوؤه الينا فيما بين أربعة إلى ألف مليون عام. ولكننا ، لا نستطيع بالطبع أن نضع ساعة على الشمس ، ونرسل منها ومضة من الضوء فى الساعة الثانية عشر ظهراً بتوقيت جرينتش ، وأن نستقبلها فى جرينتش فى الساعة الثانية عشرة وثمانى دقائق بعد الظهر ، إذ لا مناص من أن تكون مناهجنا فى تقدير سرعة الضوء غير مباشرة بصورة أو بأخرى . وأشد المناهج مباشرة هو ذلك الذى نطبقه على الصوت حين

نستخدم الصدى . ولكننا نستطيع أن نرسل شعاعا إلى مرآة ، وأن نشاهد الوقت الذى يستغرقه وصول الانعكاس إلينا . وبهذا نقيس الوقت للرحلة المزدوجة التى قطعها الشعاع إلى المرآة ، ثم ارتداده إلينا . وأيما كان الأمر ، فإن هذا الوقت قصير — على الأرض — قصراً غير مريح ، بحيث لابد للفزيائيين أن يستخدموا — فى التطبيق — منهجا أشد تعقيداً ، بيد أن المبدأ الكامن وراءها مازال هو مبدأ الصدى .

ويستخدم هذا المبدأ نفسه فى الرادار لغرض آخر ، إذ نرسل الموجات اللاسلكية السريعة جد (التى تبلغ سرعة الضوء) لترتد حين تصطدم بشىء بعيد . وعلى ذلك يمكن استنتاج بعد هذا الشىء من الوقت الذى تقطعه الموجات فى ذهابها وإيابها .

وربما قيل لنا إن مشكلة السماح بوجهة نظر المشاهد ، من المشكلات التى أدركتها الفزياء فى جميع العصور ، والحق أنها قد سيطرت على الفلك منذ عهد « كوبرنيكس » . هذا صحيح ، غير أن الاعتراف بالمبادئ يتم قبل استخلاص نتائجها الكاملة بوقت طويل . وشطر كبير من الفزياء التقليدية لا يتفق مع هذا المبدأ ، على الرغم من اعتراف الفزيائيين جميعاً بها ، من الوجهة النظرية .

ولقد وجدت طائفة من القواعد التى سببت ضربا من عدم الارتياح لذوى العقليات الفلسفية ، ولكنها كانت مقبولة لدى الفزيائيين لأنها سليمة من حيث التطبيق . وقد ميز لوك بين الصفات « الثانوية » . كالألوان ، والأصوات ، والطعم والروائح .. إلخ — وصفها بأنها ذاتية subjective بينما ذهب إلى أن الصفات « الأولية » ، كالأشكال والأوضاع والأحجام ، هى الصفات الحقيقية الأشياء الفزيائية . وكانت القواعد التى وضعها الفزيائيون وكأنها نابعة من هذا المذهب ، فذهبوا إلى أن الألوان والأصوات ذاتية ، ولكنهم أرجعوا ذلك إلى موجات تنتقل فى سرعة محددة ، هى سرعة الضوء أو الصوت على حسب الأحوال — من مصدرها إلى عين المتلقى أو أذنه . وتتباين الأشكال الظاهرية وفقاً لقوانين المنظور ، غير أن هذه القوانين بسيطة ، وتجعل من السهل استنباط

الأشكال « الحقيقية » من عدة أشكال بصرية ظاهرة ، وفضلا عن ذلك ، فإنه من الممكن التأكد من الأشكال « الحقيقية » باللمس فى حالة الأجسام المجاورة لنا . أما الزمن الموضوعى لواقعة فزيائية فمن الممكن استنباطه من الزمن الذى نشاهدها فيه بأن نضع فى اعتبارنا سرعة الانتقال — انتقال الضوء أو الصوت أو التيارات العصبية وفقا للظروف . وقد كان هذا هو الرأى الذى تبناه الفزيائيون — فى التطبيق — أياً كانت وخزات الضمير التى قد تعتريهم فى اللحظات اللامهنية .

وقد ظل هذا الرأى سليماً حتى أصبح الفزيائيون مهتمين بسرعات أكبر كثيراً من السرعات المألوفة على سطح الأرض . فالقطار السريع يسير بسرعة ميل فى الدقيقة ، أما الكواكب فتسير عدة أميال قلائل فى الثانية الواحدة . وتسير الشهب حين تكون قريبة من الشمس ، بسرعة أكبر كثيراً ، ولكن نظراً لأن أشكالها فى تغير مستمر ، فإنه من المحال تحديد مواقعها تحديداً دقيقاً جداً .. وقد كانت الكواكب — من الوجهة العملية — هى أسرع الأجسام المتحركة التى يمكن تطبيق علم الديناميكا عليها تطبيقاً مناسباً . وباكتشاف النشاط الإشعاعى والأشعة الكونية ، وببناء الآلات الخاصة بتوليد الطاقة ذات السرعة العالية ، أصبح من من الممكن وجود مجالات جديدة للمشاهدة . وصار من الممكن مشاهدة حركة أجزاء الذرة ، تلك الجسيمات التى تتحرك بسرعات لاتقل كثيراً عن سرعة الضوء . ولم يكن سلوك هذه الأجسام المتحركة بتلك السرعات الهائلة هو السلوك الذى تؤدى بنا النظريات القديمة إلى توقعه ، ومن أمثلة ذلك ، أنه كان يبدو أن الكتلة تزداد مع السرعة بصورة محددة تحديداً تاماً . وحين كان الإلكترون يتحرك بسرعة كبيرة ، كان يتطلب قوة أعظم حتى يمكن التأثير عليه التأثير المطلوب ، كما لو كان يتحرك حركة بطيئة . ثم وجدت الأسباب التى تدعو إلى التفكير فى أن الجسم يتأثر بالحركة ، فلو أنك أخذت مثلا مكعباً وحركته بسرعة كبيرة فإنه يبدو أقصر فى اتجاه حركته ، من وجهة نظر شخص لايتحرك معه وإن كان يبقى كما هو تماما من وجهة نظره هو (أى من وجهة نظر مشاهد يتحرك معه فى نفس اتجاهه) . وكان أشد من ذلك إثارة للدهشة اكتشاف أن مرور الزمن يتوقف على الحركة ، أعنى لو أن هناك ساعتين دقيقتين دقة تامة ، وتتحرك إحداهما بسرعة كبيرة بالنسبة للأخرى فإنهما لن تستمرا فى بيان الزمن نفسه لو أنهما

عادتا معاً مرة أخرى عقب رحلة ما. وقد كان هذا الأثر ضئيلا جدا بحيث لم يكن من الممكن إختباره حتى الآن ، ولكنه من الممكن اختباره لو أننا نجحنا فى تقدم السفر خلال الفضاء ، إذ أننا ستتمكن حينئذ من القيام برحلات طويلة طولا يكفى لتقدير هذا التمدد الزمانى كما يطلقون عليه .

وهناك بينة مباشرة على «التمدد الزمانى» ولكنها توجد بطريقة مختلفة . هذه البينة تأتى من المشاهدات الخاصة بالأشعة الكونية التى تتألف من مجموعة متباينة من الجسيمات الذرية القادمة من الفضاء الخارجى ، والتى تتحرك مخترقة الغلاف الجوى للأرض بسرعة عظيمة . وتتحلل بعض هذه الجسيمات التى تسمى « الميزونات » فى أثناء طيرانها ، ومن الممكن مشاهدة هذا التحلل. وكلما كانت حركة الميزون أسرع ، كانت عملية تحلله أطول من وجهة نظر العالم الموجود على الأرض ، ويتبع مثل هذه النتائج أن — ما نكتشفه بوساطة الساعات والمساطر التى اعتدنا أن ننظر إليها بوصفها ذروة العلم — تعتمد حقاً إلى حد ما على الظروف الشخصية ، أى على الطريقة التى تتحرك بها بالنسبة للأجسام التى نقيسها .

وهذا يبين أننا لابد أن ننتهج خطة مختلفة عن الخطة المعتادة فى التمييز بين ما ينتسب إلى المشاهد وما ينتسب إلى الواقعة التى يشاهدها ، ولو أن رجلا كان يضع نظارات زرقاء فإنه يعرف أن نظرته الزرقاء إلى كل شىء ترجع إلى نظاراته لا إلى مايشاهده. ولكنه إذا كان يشاهد ومضتين من البرق ، وسجل فترة الزمن بين مشاهداته ، وإذا كان يعلم أين حدثت هاتان الومضتان ، وسجل فى كل حالة الزمن الذى يستغرقه الضوء فى الوصول إليه ، ففى هذه الحالة إذا كان الكرونومتر الذى يقيس به دقيقاً ، فسوف تعيقه بالطبع أنه قد اكتشف فترة الزمن الفعلية بين الومضتين لا مجرد شىء شخصى خاص به فحسب . ويتأكد رأيه بهذه الحقيقة وهى أن المشاهدين الآخرين جميعاً المتصلين به يوافقون على تقديراته. وهذا يرجع على كل حال إلى هذه الحقيقة فحسب وهى أن هؤلاء المشاهدين جميعا موجودون على الأرض ويشاركون فى حركتها . بل إن اثنين من المشاهدين كلا منهما فى طيارة تتحرك فى اتجاه مضاد الأخرى سيكون لهما على أقصى تقدير سرعة نسبية مقدارها ثلاثة آلاف ميل فى الساعة ، وهى سرعة ضعيفة جداً إذا قورنت بـ ١٨٦,٠٠٠ ميل فى الثانية (وهى سرعة الضوء) ولو استطاع إلكترون

سرعته ١٧٠٫٠٠٠ ميل فى الثانية أن يشاهد الوقت الذى انقضى بين الومضتين لوصل إلى تقدير مختلف تمام الاختلاف بعد أن يضع فى اعتباره سرعة الضوء .. وقد يسألنى القـــارئ : وكيف تعرف ذلك ! إنك لست إلـكتروناً ، كما أنك لاتستطيع أن تتحرك بتلك السرعات المخيفة، ومامن عالم قام بالمشاهدات التى تثبت حقيقة عبارتك . ومع ذلك فهناك كما سنرى فيما يلى — أساساً طيباً لهذه العبارة — أساساً فى التجربة — أولا وقبل كل شىء ، وأساساً — وهذا هو الشىء العجيب — فى الحجج التى كان من الممكن أن تساق فى أى عصر ، ولـكنها لم تقم حتى أثبتت التجارب أن الحجج لابد أن تـكون مخطئة .

وثمة مبدأ عام تهيب به نظرية النسبية، وقد اتضح أن هذا المبدأ أقوى مما يمكن أن يفترضه أى إنسان ، فإذا علمت أن رجلا أغنى من رجل آخر مرتين فهـذه الحقيقة تظل كما هى سواء قدرت ثروة كليهما بالجنيهات أو بالدولارات أو بأية عملة أخرى . ستتغير الأرقام التى تمثل ثروتيهما ، بيد أن رقماً سيظل دائماً ضعف الرقم الآخر. وهذا الشىء نفسه يعود للظهور فى الفزياء — فى صور أشد تعقيداً . ولما كانت كل حركة نسبية فمن الممكن أن تأخذ أى جسم تشاء على أنه معيار الإسناد أو المعيار الأساسى standard of reference وأن تقدر الحركات الأخرى جميعاً بالإشارة إلى هذا الجسم . فإذا كنت فى قطار وتسير صوب عربة الأكل فمن الطبيعى فى هذه اللحظة أن تعامل القطار على أنه ثابت وأن تقدر حركتك بالنسبة إليه ، ولـكنك حين تفـكر فى الرحلة التى تقوم بها فإنك تفكر فى الأرض بوصفها ثابتة ، فتقول إنك تتحرك بسرعة ستين ميلا فى السـاعة ؛ والفلـكى الذى يعنى بالنظام الشمسى يأخذ الشمس بوصفها ثابتة ، وينظر إليك على أنك تدور وتلف، وإذا قورنت حركة القطار بهذه الحركة فإن القطار يبدو بطيئاً إلى درجة يمكن معها إهمال سرعته . وقد يضيف الفلـكى المهتم بالسكون النجمى حركة الشمس بالنسبة لمتوسط سرعة النجوم . وأنت لاتستطيع أن تقول إن طريقة من هذه الطرق التى تقدر بها حركتك أصح من الطرق الأخرى، فكل منها صحيحة مادامت قد حددت جسم الإسناد . وكما أنك تستطيع أن تقدر ثروة شخص ما بعملات مختلفة دون أن تغير علاقتها بثروات الآخرين، فكذلك تستطيع أن تقدر حركة جسم ما بوساطة

أجسام إسناد مختلفة دون تغيير علاقتها مع الحركات الأخرى. ولما كانت الفزياء معنية بالعلاقات عناية كاملة فلابد أن يكون من الممكن التعبير عن قوانين الفزياء جميعاً بإرجاع الحركات كلها إلى أى جسم معين بوصفه معياراً .

ونستطيع أن نعبر عن هذه المسألة بطريقة أخرى . الفزياء تهدف إلى إعطاء المعلومات عما يحدث حقيقة فى العالم الفزيائى ، لاعن الإدراكات الخاصة للشاهدين المنفصلين فحسب . ومن ثم ينبغى أن تهتم الفزياء بتلك السمات التى تشترك فيها العملية الفزيائية بالنسبة للشاهدين جميعاً ، مادامت هذه السمات هى التى يمكن النظر إليها على أنها تنتمى إلى الواقعة الفزيائية نفسها ، وهذا يقتضى أن تكون القوانين التى تتحكم فى الظواهر هى نفسها سواء وصفت هذه الظواهر كما تبدى لمشاهد ، أو وضعت كما تبدو لمشاهد آخر ، وهذا المبدأ الوحيد هو الدافع المولد لنظرية النسبية بأسرها .

والآن ، لقد وجدنا ما كنا ننظر إليه بوصفه الصفات المكانية والزمانية فى الوقائع الفزيائية — وجدناه معتمداً إلى حد كبير على المشاهد ، ولا يمكن أن تعزى سوى فضلة فحسب إلى الوقائع نفسها ، وهذه الفضلة (أو البقية) وحـــدها هى ما يمكن أن يدخل فى صياغة أى قانون فزيائى تتاح له فرصة « قبلية » لكى يكون صحيحاً . وقد وجد أينشتين أداة جاهزة تحت تصرفه فى الرياضة البحتة هى ماتعرف باسم نظرية الكميات الممتدة theory of tensors وهذه النظرية مكنته من اكتشاف قوانين يتم التعبير عنها فى مصطلح البقية الموضوعية وتتفق اتفاقاً تقريباً — مع القوانين القديمة ، وفى الأجزاء التى تختلف فيها قوانين أينشتين عن القوانين القديمة ، تثبت أنها أكثر اتفاقاً مع المشاهدة .

ولو لم يكن ثمة واقع فى العالم الفزيائى ، بل مجرد طائفة من الأحلام راودت أشخاصاً مختلفين ، لما كان لنا أن نتوقع العثور على أية قوانين تربط أحـــلام شخص بأحلام شخص آخر . والرابطة الوثيقة بين الإدراكات الحسية لشخص ما وبين الإدراكات الحسية التى يشعر بها شخص آخر فى الوقت نفسه ، هذه الرابطة هى التى تجعلنا نعتقد فى أصل خارجى مشترك للإدراكات المختلفة المترابطة . وتعنى الفزياء بالتشابهات والاختلافات الموجودة بين إدراكات الناس لما نسميه

واقعة واحدة بعينها . ولكن ، لكى نفعل ذلك ، فمن الضرورى أولا بالنسبة للفزيائى أن يجد التشابهات . وليست هذه التشابهات هى التشابهات التقليدية المفترضة تماماً . إذ ليس من الممكن أن تأخذ الزمان أو المكان كلا على انفصال بوصفه موضوعياً دقيقاً . والموضوعى نوع من المزيج مؤلف من الاثنين يسمى متصل « المكان — الزمان » Space-time . وشرح ذلك ليس بالشىء اليسير ، ولكن ينبغى أن نقدم على هذه المحاولة ، وهذا ماسنشرع فيه فى الفصل التالى .

الفصل الثالث

سرعة الضوء

ترتبط معظم الأشياء العجيبة فى نظرية النسبية بسرعة الضوء . وإذا كان القارئ يريد أن يلم بالأسباب التى دعت إلى هذه الإعادة الخطيرة للبناء النظرى ، فلابد من أن تكون لديه فكرة عن الحقائق التى جعلت النسق القديم ينهار .

وقد استقرت هذه الحقيقة — وهى أن الضوء ينتقل بسرعة محددة — استقرت أولا عن طريق المشاهدات الفلكية .. فأقمار المشترى يكسفها المشترى أحيانا ، ومن اليسير حساب الأوقات التى يحدث فيها ذلك . واتضح أنه عندما يكون المشترى قريباً من الأرض قرباً غير عادى ، نشاهد أن أحد أقماره ينكسف قبل الوقت المنتظر بعدة دقائق ، وأنه حين يبتعد المشترى بعداً غير مألوف عن الأرض تحدث هذه الظاهرة بعد ذلك بدقائق قليلة عن الوقت المتوقع . ووجد أنه من الممكن تفسير هذه الانحرافات بافتراض أن للضوء سرعة معينة بحيث أن هذا الذى نشاهده يحدث للمشترى ، إنما قد حدث حقاً قبل ذلك بقليل — وأطول حين يكون المريخ بعيداً منه حين يكون قريباً . وكذلك وجد أيضا أن سرعة الضوء نفسها تفسر حقائق مماثـــلة فيما يتعلق بأجزاء أخرى من النظام الشمسى . ومن ثم فقد اتفق العلماء على أن الضوء ينتقل فى الفراغ دائما بسرعة ثابتة معينة هى — على وجه الدقة حوالى ٣٠٩٫٠٠٠ كيلو متر فى الثانية (الكيلو متر يعادل خمسة أثمان الميل) . وحين ثبت أن الضوء يتألف من موجات ، أصبحت هذه السرعة هى سرعة انتشار الموجات فى الأثير — أو على الأقل «كانت» هذه الموجات تنتشر فى الأثير ، فقد أصبح الأثير الآن شيئا مشكوكاً فيه ، وإن بقيت الموجات . وهذه السرعة نفسها هى سرعة الموجات اللاسلكية (التى تشبه موجات الضوء ولكنها أطول) وأشعة إكس (التى تشبه موجات الضوء ، ولكنها أقصر) . ومن المعتقد عامة فى هذه الأيام أن هذه السرعة هى السرعة التى تنتشر بها الجاذبية . (وكان من المعتقد — قبل اكتشاف نظرية النسبية أن الجاذبية

تنتشر انتشاراً فورياً ، بيد أن هذا الرأى أصبح الآن بلا أساس) .

إلى هنا ، والأمور تسير سيراً هيناً .. ولكن، ما إن أصبح من الممكن إجراء قياسات دقيقة حتى بدأت الصعوبات تتراكم . فلقد كان من المفروض أن الموجات موجودة فى الأثير ، وبالتالى فإنه ينبغى أن تقاس سرعتها بالنسبة للأثير وبما أن الأثير (إذا كان له وجود) لايبدى أية مقاومة لحركات الأجرام السماوية ، فمن الطبيعى افتراض أنه لايشارك فى حركتها . ولو أن الأرض تدفع أمامها كمية من الأثير كما تدفع السفينة المياه أمامها ، فسيتوقع المرء مقاومة من جانب الأثير مماثلة للمقاومة التى يبديها الماء للسفينة . ومن ثم انعقد الرأى العام على أن الأثير يمكن أن ينفذ من خلال الأجسام دون صعوبة ، كما ينفذ الهواء خلال غربال غليظ ، بل إن الأثير ليس نفاذاً . وإذا كان الأمر كذلك ، فلابد أن تكون الأرض وهى تدور فى فلكها سرعة بالنسبة الأثير . وإذا كانت تتحرك عند نقطة من فلكها مع الأثير ، فإنها لابد أن تتحرك فى نقاط أخرى خلاله بنفس السرعة . فلو أنك قمت بنزهة دائرية فى يوم عاصف ، فلابد أن تسير شطراً من الرحلة ضد الريح ، أياً كان اتجاه هذا الريح ، والمبدأ فى هذه الحالة واحد بعينه . ويلزم عن ذلك أنك لو اخترت يومين يبعد أحـــدهما عن الآخر ستة أشهر ، حين تكون الأرض فى فلكها تتحرك فى اتجاهين متضادين تماماً ، فلابد أنها تتحرك ضد — ريح — الأثير فى يوم واحد على الأقل من هذين اليومين .

والآن ، إذا كانت هناك ريح — أثيرية — فمن الواضح أنه بالنسبة لمشاهد يقف على الأرض ، سوف يبدو أن الإشارات الضوئية تنتقل بسرعة أكبر مع الريح منها حين تخترقه ، وأنها أسرع حين تخترقه — منها حين تكون ضده . وهذا ماشرع ميكلسون ومورلى فى اختباره بتجربتهما الشهيرة . فقد بعثا بإشارات ضوئية فى اتجاهين متعامدين ، وانعكس كل منهما من مرآة، وارتد كل منهما إلى المكان الذى أرسل منه . وهنا يستطيع كل إنسان أن يتحقق من هذه الواقعة سواء بالتجربة أو بشىء بسيط من الحساب ، أيهما يستغرق وقتا أطول : إذا جدفت مسافة معينة فى اتجاه التيار ثم عدت إلى مكانك ، أم إذا جدفت نفس المسافة بعرض النهر ثم عدت مرة ثانية ؟ وعلى ذلك إذا كان هناك ريح أثيرية فلابد أن تنتقل إحدى الإشارتين

الضوئيتين اللتين تتألفان من موجات فى الأثير - إلى المرآة ثم ترتد بسرعة أبطأ من الإشارة الضوئية الأخرى . وحاول ميكلسون ومورلى القيام بهذه التجربة ، وحاولا القيام بها فى أوضاع مختلفة وقاما بها مرة أخرى فيما بعد. وكان جهازهما دقيقاً دقة تكفى للكشف عن الاختلاف المتوقع فى السرعة أو اختلاف أصغر من ذلك كثيراً إن وجد . ولكنهما لم يشاهدا اختلافاً أياً كانت ضآلته . وكانت النتيجة مفاجأة لهما ، كما كانت مفاجأة لكل من عداهما. غير أن التكرارات الدقيقة جعلت الشك محالا . وقد أجريت التجربة لأول مرة عام ١٨٨١ ثم أعيدت بمزيد من التعقيد عام ١٨٨٧ ولكن كان لابد من انقضاء أعوام طويلة حتى يمكن تفسيرها تفسيراً صحيحا .

فقد وجد أن الافتراض القائل بأن الأرض تحمل الأثير المجاور معها فى حركتها افتراض مستحيل لعدة أسباب . وبالتالى ، بدا وكأنما أقيم سد منطق حاول علماء الفزياء فى بداية الأمر - انتزاع أنفسهم منه بوضع افتراضات تحكمية للغاية. كان أهم هذه الافتراضات الافتراض الذى وضعه فتزجيرالد وأكمله لورانتس . وهو المعروف بافتراض فتزجيرالد عن التقلص Fitzgerald Contraction hypothesis ويقول هذا الافتراض إنه حين يكون جسم ما متحركاً فإنه يتقلص فى اتجاه حركته بنسبة معينة تتوقف على سرعته. وكمية التقلص كافية لتفسير النتيجة السلبية التى أسفرت عنها تجربة ميكلسون - مورلى ، ولابد أن تكون الرحلة مع التيار والعودة إلى نقطة البداية أقصر حقاً من الرحلة التى يقوم بها المرء بعرض النهر ، كما لابد أن تعبره فى الوقت نفسه . وبالطبع لم يكن من الممكن تسجيل التقلص بالمقاييس لأن قضباننا المقياسية ستشارك فيه . فالمسطرة المقسمة إلى أقدام ستكون أقصر إذا وضعت فى خط حركة الأرض منها إذ وضعت متعامدة على خط حركة الأرض. ووجهة النظر هذه شبيهة بخطة الفارس الأبيض الذى أراد ان يصبغ فوديه باللون الأخضر مستخدماً فى نفس الوقت مروحة كبيرة تحجبهما دائماً. والغريب فى الأمر أن الخطة نجحت نجاحاً لا بأس به، وحين بحث أينشتين فيها بعد نظريته النسبية الخاصة (١٩٠٥) وجد أن الافتراض صحيح بمعنى ما، ولكن بمعنى ما فحسب ، اى أن ذلك التقلص المفترض ليس حقيقة فيزيائية ولكنه نتيجة لمواضعات معينة فى القياس وهى مواضعات

إذا وجدت وجهة النظر الصحيحة ولو مرة واحدة - فإننا نرغم على اعتناقها . بيد أنني لا أريد أن أعرض حل أينشتين لهذا اللغز بعد ، وإنما أريد فى الوقت الحاضر أن أوضح طبيعة اللغز نفسه .

واذا اقتصرنا على سطح المسألة وبقينا بمعزل عن الافتراض لهذا السبب ، فقد أوضحت تجربة ميكسلون - مورلى (مع غيرها من التجارب) أن سرعة الضوء بالنسبة للأرض - هى نفسها فى جميع الاتجاهات ، وهذا يصدق على أوقات السنة كلها على الرغم من أن اتجاه حركة الأرض يتغير دائماً فى دورانها حول الشمس. وقد ظهر فضلا عن ذلك - أن هذه الصفة لا تقتصر على الأرض وحدها ، ولكنها تنطبق على الأجسام جميعا . فإذا أرسلت إشارة ضوئية من جسم ما فإن هذا الجسم سيبقى فى مركز الموجات أثناء انتقالها الى الخارج بغض النظر عن كيفية تحركها - وعلى الأقل فإن هذا سيكون رأى المشاهدين الذين يتحركون مع الجسم وهذا هو المعنى الواضح الطبيعى لتلك التجارب ،وقد نجح أينشتين فى اختراع نظرية تقبل هذه التجارب ، بيد أن العلماء كانوا يعتقدون - فى البداية - أن قبول هذا المعنى الواضح الطبيعى مستحيل منطقياً .

وستوضح بعض الأمثلة القليلة مدى ما تنطوى عليه هذه الحقائق من غرابة . حين تطلق قذيفة ، فإنها تتحرك حركة أسرع من الصوت ، ويرى الناس الذين أطلقت عليهم القذيفة الومضة أولا ثم يرون بعد ذلك(اذا كانوا محظوظين)القذيفة وهى تنطلق. ويسمعون صوتها فى نهاية الأمر ، ومن الجلى أنه لو وضعت مشاهداً علمياً على القذيفة فإنه لن يسمع الصوت مطلقاً لأن القذيفة سوف تنفجر وتقتله قبل أن يصل إليه صوتها . ولكن إذا كان الصوت يسير على نفس المبدأ الذى يتبعه الضوء فإن مشاهدنا سوف يسمع كل شىء وكأنه ثابت لم يتحرك من مكانه . وفى هذه الحالة لو ربط ستار - صالح لإحداث الأصداء - بالقذيفة منتقلا معها - وليكن ذلك بمائة ياردة أمامها - فإن مشاهدنا سوف يسمع صدى الصوت من الستار بعد فترة الزمن نفسها وكأنه هو والقذيفة ثابتان فى مكانهما . وهـــذه بلا شك تجربة ليس من الممكن إجراؤها ، غير أن بعض التجارب التى يمكن إجراؤها ستوضح الفرق . قد تجد مكانا على خط حديدى حيث يوجد صدى منبعث من مكان بعيد

على هذا الخط وليكن مكانا يخترق فيه الخط الحديدى نفقا ـ وحين يسير قطار على الخط دع رجلا على الرصيف يطلق مسدساً . فإذا كان القطار يسير صوب الصدى فسوف يسمع الركاب الصدى بأسرع ما يسمعه الرجل الموجود على الرصيف . وإذا كان القطار يسير فى الاتجاه المضاد فسوف يسمعونه بعد ذلك . بيد أن هذه ليست هى الظروف التى أجريت فيها تجربة ميكلسون ـ مورلى تماماً . فالمرايا فى هذه التجربة تناظر الصدى ، ولكن المرايا تتحرك مع الأرض وهكذا كان ينبغى أن يتحرك الصدى مع القطار . فلنفترض أن الطلقة أطلقت من عربة الحارس وأن الصدى يأتى من ستار على القاطرة ، وسنفترض أن المسافة بين عربة الحارس والقاطرة هى المسافة التى يمكن أن يقطعها الصوت فى الثانية (حوالى خمس ميل) وأن سرعة القطار هى $\frac{١}{١٢}$ من سرعة الصوت (حوالى ستين ميلا فى الساعة) . وهكذا تكون لدينا الآن تجربة يمكن أن يجريها ركاب القطار ، فإذا كان القطار ثابتاً ، فسيسمع الحارس الصدى فى ثانيتين ، أما إذا كان متحركا ـ وفقا لما افترضت ـ فسوف يسمع الصدى فى ثانيتين و $\frac{٢}{١٤٣}$ من الثانية . فإذا كان يعرف سرعة الصوت ، فإنه يستطيع من هذا الفرق أن يحسب سرعة القطار حتى ولو كان ذلك فى ليلة يسودها الضباب بحيث لا يستطيع أن يرى الجانبين . ولكن إذا كان الصوت يسلك مسلك الضوء فإنه سوف يسمع الصدى فى ثانيتين أياً كانت السرعة التى يسير بها القطار.

وسوف تساعدنا أمثلة أخرى على أن نتبين من وجهة نظر التقاليد والفطرة السليمة ـ مدى خروج الوقائع الخاصة بسرعة الضوء عن المألوف . فكل منا يعرف أنك لو كنت فى « سلم صاعد » فإنك سوف تصل إلى القمة لو أنك مشيت أسرع مما لو وقفت بلا حراك. ولكن إذا كان السلم الصاعد يتحرك بسرعة الضوء (وهذا ما لا يفعله حتى فى نيويورك) فإنك ستصل إلى القمة فى نفس اللحظة سواء مشيت أم بقيت ساكناً . وإليك مثلا آخر : لو أنك كنت سائراً فى طريق بسرعة أربعة أميال فى الساعة . وعبرت بك سيارة فى نفس الاتجاه بسرعة أربعين ميلا فى الساعة وإذا مضيت أنت والسيارة فى المسير ، فإن المسافة بينك وبينها ستكون بعد ساعة ستة وثلاثين ميلا . ولكن إذا التقت بك السيارة ، لأنها تسير فى الاتجاه المضاد ، فإن المسافة بينكما ستكون بعد ساعة أربعة وأربعين ميلا . والآن ، إذا كانت السيارة تسير بسرعة الضوء ، فلن يكون ثمة خلاف سواء التقت بك أم تجاوزتك ، ففى

كلتا الحالتين ، ستكون بعد ثانية واحدة ، على بعد ١٨٦٠٠٠ ميل منك ، بل إنها ستكون أيضا على بعد ١٨٦٠٠٠ ميل من أية سيارة تصادف أنها تجاوزتك أو التقت بك بسرعة أقل فى الثانية السابقة . وهذا يبدو محالا ، إذ كيف تكون السيارة على نفس المسافة بالنسبة لعدد من النقط المختلفة الواقعة على طـــول الطريق ؟

فلنأخذ مثلا آخر ، حين تلمس ذبابة سطح بركة راكدة ، فإنها تحدث موجات تتحرك إلى الخارج فى دوائر تتسع شيئا فشيئا . ومركز الدائرة فى أية لحظة هو النقطة التى لمستها الذبابة من البركة . وإذا تحركت الذبابة فوق سطح البركة ، فإنها لن تبقى فى مركز الموجات . ولكن إذا كانت هذه الموجات هى موجات الضوء وكانت الذبابة عالماً فيزيائيا محنكا ، فسوف تجد أنها باقية دائماً فى مركز الموجات أيا كانت حركتها . وفى الوقت نفسه ، سوف يحكم الفزيائى المحنك الذى يجلس إلى جانب البركة ـ سيحكم ـ كما هو الحال فى الموجات العـــادية ـ بأن المركز لم يكن الذبابة ، بل نقطة البركة التى لمستها الذبابة . وإذا لمست ذبابة أخرى سطح المـاء فى نفس النقطة وفى نفس اللحظة ، فستجد أنها باقية فى مركز الموجات ، حتى ولو فصلت نفسها بعيداً عن الذبابة الأولى . وهذا يماثل تجربة ميكلسون ـ مورلى ، مماثلة تامة ، فالبركة تناظر الأثير ، والذبابة تناظر الأرض ، واتصال الذبابة بالبركة يناظر الإشارة الضوئية التى بعث بها ميكلسون ومورلى ، كما تناظر الموجات المـائية موجات الضوء .

وقد تبدو هذه الحالة مستحيلة للوهلة الأولى . فليس غريباً أنه على الرغم من أن تجربة ميكلسون ـ مورلى قد أجريت عام ١٨٨١ فإنها لم تفسر تفسيراً صحيحاً إلا عام ١٩٠٥ . دعنا نرى الآن ما نقصده بما قلناه تماماً . خذ الرجل السائر فى الطريق الذى عبرت به السيارة . وافترض أن هناك عدداً من الناس فى نفس النقطة من الطريق ، بعضهم يمشى وبعضهم الآخر يستقل سيارة ، وافترض أنهم يسيرون بسرعات متباينة ، وفى اتجاهات مختلفة . أقول إنه لو أرسلت فى هذه اللحظة ومضة ضوئية من المكان الذى يوجدون فيه جميعاً ، فإن الموجات الضوئية ستكون على بعد ١٨٦٠٠٠ ميل من كل منهما بعد مرور ثانية واحدة من ساعته

على الرغم من أن المسافرين لن يكونوا جميعاً حينذاك فى مكان واحد بعينه . وفى نهاية ثانية واحدة ـ بساعتك ـ ستكون على بعد ١٨٦٫٠٠٠ ميل منك ، كما ستكون على بعد ١٨٦٫٠٠٠ ميل من الشخص الذى التقى بك حين أرسلت الومضة ولكنه كان يتحرك فى الاتجاه المضاد بعد ثانية واحدة من ساعته ـ مفترضين أن الساعتين مضبوطتان . فكيف يمكن أن يحدث ذلك ؟

ثمة طريقة واحدة فحسب لتفسير مثل هذه الوقائع ، وهذه الطريقة هى أن نفترض أن ساعات الجيب وساعات الحائط تتأثر بالحركة . ولا أعنى بذلك أنها تتأثر بطرائق يمكن علاجها بمزيد من الدقة فى التركيب ، بل أعنى شيئاً آخر أكثر جوهرية . وإنما أعنى أنك حين تقول إن ساعة قد انقضت بين حادثتين ، وحين تؤسس تأكيدك هذا على قياسات مثالية دقيقة قامت بها كرونومترات مثالية فى دقتها ، فإن شخصاً مماثلك فى الدقة ، كان يتحرك بسرعة نسبية بالنسبة لك ، قد يحكم بأن الزمن كان أكثر أو أقل من ساعة . فى هذه الحالة لن نستطيع أن نقول إن شخصاً منكما على صواب ، والآخر مخطىء ، كما أنك لا تستطيع أن تفعل ذلك إذا استخدم أحدكما ساعة مضبوطة على وقت جرينتش واستخدم الآخر ساعة مضبوطة على وقت نيويورك . أما كيف يحدث ذلك ، فهذا ما سأشرحه فى الفصل التالى .

وهناك أشياء أخرى عجيبة تتعلق بسرعة الضوء . ومن هذه العجائب أنه ما من جسم مادى يمكن أن يتحرك أبداً بسرعة الضوء . أيا كانت القوة التى تدفعه ، وأيا كان طول الزمن الذى يمكن أن تؤثر به هذه القوة . وربما أعاننا مثل على توضيح ذلك . يرى المرء أحياناً فى المعارض مجموعة من الأرصفة المتحركة ، تدور وتدور فى دائرة ، الرصيف الخارجى يدور بسرعة أربعة أميال فى الساعة ، والرصيف الذى يليه يدور بسرعة تزيد أربعة أميال عن سرعة الأول وهلم جرا . وتستطيع أن تخطو من واحد إلى الآخر حتى تجد نفسك تدور بسرعة هائلة . والآن ، ربما اعتقدت أنه ما دام الرصيف الأول يقطع أربعة أميال فى الساعة ، وأن الثانى يتحرك بسرعة تزيد أربعة أميال على سرعة الأول . فهذا معناه أن الرصيف الثانى يقطع ثمانية أميال بالنسبة للأرض . وهذا خطأ . ذلك أن

الرصيف الثانى تقل سرعته قليلا عن ذلك ، بحيث لا تستطيع أدق القياسات أن تكتشف الفرق . وأريدأن أوضح ما أعنيه توضيحاً تاماً . وسأفترض أننا فى الصباح والجهاز على أهبة العمل ، وهناك ثلاثة رجال يقفون فى صف واحد وكل منهم يحمل كرونومتراً دقيقاً ، الأول على الأرض ، والثانى على الرصيف الأول ، والثالث على الرصيف الثانى . ويتحرك الرصيف الأول بسرعة أربعة أميال فى الساعة بالنسبة الأرض . وأربعة أميال فى الساعة معناها ٣٥٢ قدماً فى الدقيقة ، ويحدد للرجل الواقف على الأرض بعد دقيقة من ساعته المكان المقابل على الأرض للرجل الموجود على الرصيف الأول ، وهذا الرجل يقف ساكنا بينما كان الرصيف يدور به . ويقيس الرجل الواقف على الأرض المسافة على الأرض من المكان الذى يقف فيه إلى النقطة المقابلة للرجل على الرصيف الأول فيجدها ٣٥٢ قدماً ، ويسجل الرجل الواقف على الرصيف الأول ـ بعد مرور دقيقة من ساعته ، النقطة المقابلة على رصيفه للرجل الموجود على الرصيف الثانى، ويقيس الرجل الواقف على الرصيف الأول المسافة بينه وبين النقطة المقابلة للرجل الواقف على الرصيف الثانى ، فيجد أنها ٣٥٢قدما مرة أخرى . مشكلة : إلى أى مدى يمكن أن يحدد الرجل الواقف على الأرض المسافة التى قطعها الرجل الواقف على الرصيف الثانى فى دقيقة واحدة ؟ أعنى ، لو أن الرجل الواقف على الأرض حدد بعد دقيقة واحدة من ساعته ـ المكان المقابل على الأرض للرجل الموجود على الرصيف الثانى ، فما بعد هـــذه النقطة عن الرجل الواقف على الأرض ؟ ستقول إنها ضعف ٣٥٢ قدما ، أى ٧٠٤ قدماً ، ولكنها ستكون فى الحقيقة أقل قليلا ، وإن تكن من القلة القليلة بحيث لا يكون ثمة سبيل إلى تقديرها . وهـذا الاختلاف راجع إلى أن الساعتين لا تحافظان على الوقت المضبوط . على الرغم من أن كلتيهما دقيقة من وجهة نظر صاحبها . فإذا كانت لديك مجموعة طويلة من هذه الأرصفة المتحركة ، وكل منها يتحرك أربعة أميال فى الساعة بالنسبة للرصيف الذى قبله ، فإنك لن تصل أبدا إلى النقطة التى يتحرك فيها الرصيف الأخير بسرعة الضوء بالنسبة للأرض ، حتى ولو كان لديك ملايين منها . وهذا الفرق الضئيل . بالنسبة للسرعات الصغيرة ، يتضخم مع تزايد السرعة ، ويجعل سرعة الضوء حداً لا سبيل إلى الوصول إليه . أما كيف يحدث هذا كله ، فهو الموضوع التالى الذى ينبغى أن نتناوله .

الفصل الرابع

الساعات والمساطر

لم يفكر أحد — قبل ظهور النسبية الخاصة — فى أنه من الممكن أن يوجد أى لبس فى العبارة القائلة بأن حادثتين فى مكانين مختلفين قد حدثتا فى وقت واحد. وقد يقبل المرء أنه إذا كان المكانان بعيدين جدا ، فقد تكون ثمة صعوبة فى التيقن من أن الحادثتين قد وقعتا فى زمن واحد معاً ، بيد أن كل إنسان كان يعتقد أن معنى المسألة محدد تماماً . وأيا كان الأمر ، فقد ظهر فيما بعد أن هذا الاعتقاد خاطىء . فقد تبدو حادثتان فى مكانين متباعدين على أنهما حدثتا فى وقت معا بالنسبة لمشاهد واحد اتخذ جميع الاحتياطات اللازمة ليضمن الدقة (واضعاً فى اعتباره — على وجه الخصوص — سرعة الضوء) ، بينما قد يقدر مشاهد آخر لا يقل عن الأول فى دقته أن الحادثة الأولى قد سبقت الثانية ، وقد يحكم ثالث بأن الحادثة الثانية سبقت الأولى وقد يحدث هذا إذا كان المشاهدون الثلاثة يتحركون بسرعة : الواحد بالنسبة للآخرين . ولن يكون أحدهما — فى هذه الحالة — مصيباً والاثنان الآخران مخطئين ، بل سيكون الثلاثة جميعاً مصيبين . والنظام الزمنى الذى وقعت الحوادث وفقا له يتوقف إلى حد ما على المشاهد . فهو ليس دائماً وبأكمله علاقة باطنية بين الحوادث نفسها . وقد أثبت أينشتين أن هذا الرأى لا يفسر الظواهر فحسب ، بل إنه هو أيضاً الرأى الذى ينبغى أن ينتج عن التفكير المنطقى الدقيق المؤسس على المعطيات القديمة . ومهما يكن من أمر ، ففى الواقع الفعلى ، لم يلحظ أحد الأساس المنطقى لنظرية النسبية حتى أحدثت النتائج الغريبة للتجربة صدمة لملكات الناس المفكرة .

كيف نقرر — تقريراً طبيعياً — أن حادثتين فى مكانين مختلفين — وقعتا فى وقت واحد ؟ من الطبيعى أن يقول المرء : إنهما وقعتا فى وقت واحد إذا شاهدهما شخص فى منتصف المسافة بينهما — تقعان فى وقت واحد (لاصعوبة

فى آنية حادثتين وقعتا فى مكان « واحد » مثل رؤية ضوء وسماع صوت .)
فلنفترض أن ومضتين من الضوء وقعتا فى مكانين مختلفين : وليكن هذان المكانان هما مرصد جرينتش ، ومرصد كيو ، ولنفترض أن كنيسة القديس بولس فى منتصف المسافة بينهما ، وأن الومضتين تظهران فى وقت واحد لمشاهد يقف على قبة كنيسة القديس بولس . فى هذه الحالة ، سوف يرى الرجل الواقف عند مرصد كيو الومضة الواقعة عند مرصده ، كما سيرى الرجل الواقف عند جرينتش الومضة الساقطة على جرينتش أولا وذلك بسبب الوقت الذى يستغرقه الضوء فى الانتقال إلى المسافة القائمة بينهما . بيد أن الثلاثة — لو كانوا مشاهدين مثاليين فى دقتهم — سيحكمون بأن الومضتين قد حدثتا فى وقت واحد معاً ، لأنهم سوف يدخلون فى اعتبارهم بالضرورة زمن إرسال الضوء (إننى أفترض درجة من الدقة تتجاوز القدرة الإنسانية) . وهكذا ، مادام الأمر يتعلق بمشاهدين على الأرض ، فإن تعريف الآنية سيظل صحيحاً ، وما دمنا نتعامل على حوادث تقع على سطح الأرض ، فهو يعطى نتائج متسقة بعضها مع البعض الآخر ، ويمكن استخدامها فى الفزياء الأرضية بالنسبة لكل المشكلات التى يمكن أن نتجاهل فيها هذه الحقيقة ، وهى أن الأرض تدور .

بيد أن تعريفنا لن يكون مرضياً حين يكون لدينا مجموعتان من المشاهدين فى حركة سريعة إحداهما بالنسبة الأخرى . فلنفترض أننا نرى ما يمكن أن يحدث إذا استبدلنا الصوت بالضوء ، وعرفنا حادثتين بأنهما تقعان فى آن واحد إذا استمع إليهما — فى وقت واحد — شخص فى منتصف المسافة بينهما .. لن يغير هذا شيئا من حيث المبدأ ولكنه يجعل المسألة أيسر نظراً لسرعة الصوت التى هى أبطأ كثيراً من سرعة الضوء . ودعنا نفترض أنه فى ليلة ضبابية أطلق رجلان ينتميان إلى عصابة من قطاع الطرق ـ النار على الحارس وعلى سائق القاطرة فى قطار ما : الحارس موجود فى مؤخرة القطار واللصان على الخط الحديدى وهما يطلقان النار على ضحيتهما من مكان قريب . سوف يسمع سيد عجوز يركب فى منتصف القطار الطلقتين فى وقت واحد ، سيقول حينئذ إن الطلقتين حدثتا فى وقت واحد معا . غير أن ناظر المحطة الذى يوجد فى منتصف المسافة بين اللصين يسمع الطلقة

التى قتلت الحارس أولا . وقد ترك مليونير استرالى هو عم الحارس وسائق القاطرة (وهما أولاد عمومة) ثروته كلها للحارس أو لسائق القاطرة — إذا كان هو الذى مات أولا . وتدخل فى المسألة مبالغ ضخمة تتوقف على تحديد من منهما الذى مات أولا . وتذهب القضية إلى مجلس اللوردات ويتفق المحامون من كلا الطرفين لأنهم تعلموا فى أكسفورد على أنه إما أن يكون السيد العجوز راكبا القطار وإما أن ناظر المحطة مخطىء . والواقع أن كليهما قد يكون على صواب تماماً — فالقطار قد تحرك مبتعداً عن الطلقة التى أطلقت على الحارس وهو متجه صوب الطلقة التى أطلقت على سائق القاطرة ، ومن ثم فإن الضجة التى أحدثتها الطلقة التى أطلقت على الحارس ينبغى أن تمضى قبل أن تصل إلى السيد العجوز إلى أبعد من الطلقة التى أطلقت على سائق القاطرة . وبالتالى فإذا كان السيد العجوز مصيباً فى قوله إنه سمع الصوتين فى وقت واحد فلابد أن ناظر المحطة مصيب فى قوله إنه سمع الطلقة التى أطلقت على الحارس أولا .

ونحن الذين نعيش على الأرض نفضل طبعاً فى مثل هذه الحالة وجهة النظر الآنية التى يحصل عليها شخص ثابت على الأرض على نظرة شخص مسافر بالقطار . بيد أن الفزياء النظرية لا تسمح بمثل هذه التحيزات الضيقة الأفق . وللفزيائى الموجود ، على سطح شهاب — إذا وجد — من الحق فى رأيه الخاص بالآنية ما للفزيائى الموجود على الأرض . بيد أن النتائج قد تختلف بنفس الطريقة التى اختلفت بهفى مثلنا الذى أوردناه عن القطار والطلقات ، فليس القطار بأكثر حقيقة فى حركته من الأرض ، بل ليس هناك شىء حقيقى عنه . ويمكنك أن تتخيل أرنبا وسيد قشطة يتجادلان عما إذا كان الإنسان حيوانا ضخماً « حقاً » ؛ فإن كلا منهما سيعتقد أن وجهة نظره هى وجهة النظر الطبيعية ، وأن وجهة نظر الآخر مجرد تحليق فى الخيال . وينطوى الجدل عما إذا كانت الأرض أو القطار فى حركة حقاً ، على نفس هذا القدر من التهافت . ومن ثم فإننا حين نعرف الآنية بين حادثتين متباعدتين ، فليس لنا الحق فى أن نلتقط وأن نختار من بين الأجسام المختلفة المستخدمة فى تحديد نقطة منتصف الطريق بين الحادثتين . فلكل الأجسام حق متساوفى أن يقع عليها الاختيار ، ولكن إذا كانت الحادثتان قد وقعتا معاً فى آن واحد بالنسبة لجسم واحد وفقاً للتعريف ، فستكون هناك أجسام أخرى

تسبق الحادثة الأولى الحادثة الثانية بالنسبة إليها، وأجسام أخرى أيضاً تسبق الحادثة الثانية الحادثة الأولى بالنسبة إليها، وهكذا لا نستطيع أن نقول دون لبس إن حادثتين في مكانين متباعدين قد وقعتا في نفس الوقت. فإن مثل هذه العبارة لا تكتسب معنى محدداً إلا بالنسبة لمشاهد محدد فهي تنتمي إلى الشطر الذاتي من ملاحظتنا للظواهر الفزيائية، لا إلى الشطر الموضوعي الذي يدخل في القوانين الفزيائية.

ولعل هذه المسألة التي تتعلق بالزمان في أماكن مختلفة هي أصعب الجوانب بالنسبة للخيال — في نظرية النسبية، فنحن قد تعودنا على فكرة أن كل شيء يمكن تأريخه. وقد استغل المؤرخون واقعة حدوث كسوف ظاهر للشمس في الصين في ٢٩ أغسطس سنة ٧٧٦ قبل مولد المسيح[١]. وليس من شك في أن الفلكيين يستطيعون أن يحددوا الساعة والدقيقة المضبوطتين اللتين بدأ فيهما الكسوف في أن يكون كليا في أية بقعة محددة من شمال الصين، كما يبدو من الجلي أننا نستطيع ان نتحدث عن مواقع الكواكب في أي لحظة. وتمكننا نظرية نيوتن من أن نحسب المسافة بين الأرض والمشترى مثلا في أي وقت بساعات جرينتش، وهذا يمكننا من أن نعرف الوقت الذي يقطعه الضوء في ذلك الحين للانتقال من المشترى إلى الأرض، وليكن نصف ساعة، وهذا يمكننا من استنتاج أن المشترى كان منذ نصف ساعة في المكان الذي نراه فيه الآن. كل هذا يبدو جليا. ولكنه في الواقع لا يصدق في التطبيق إلا لأن سرعات الكواكب النسبية ضئيلة جداً إذا قيست بسرعة الضوء. وحين نقرر أن حادثة على الأرض وحادثة على المشترى قد وقعتا في وقت واحد — مثل أن يكون المشترى قد كسف واحداً من أقماره حين كانت ساعات جرينتش تشير إلى منتصف الليل — فإن شخصا آخر يتحرك بالنسبة الأرض، سيقرر شيئاً مختلفاً، على افتراض أن كلامنا — نحن وهو — قد وضع في اعتباره سرعة الضوء. ومن الطبيعي أن الخلاف على الآنية يستتبع خلافاً على فترات الزمن. فإذا قررنا أن حادثتين وقعتا على المشترى ينفصلان بأربعة وعشرين ساعة، فقد يحكم شخص آخر أن الزمن الذي يفصل بينهما كان أطول، هذا إذا كان يتحرك بسرعة أكبر بالنسبة للمشترى وبالنسبة للأرض.

---

(١) يقول نشيد صيني معاصر لهذا الكسوف، بعد أن حدد اليوم من السنة بالضبط: «أما أن ينكسف القمر، فهذه مسألة عادية. والآن وقد انكسفت الشمس، فياله من أمر سيء» (رسل)

وهكذا لم يعد الزمن الكونى الكلى الذى درجنا على أن نأخذه بلا مناقشة أمراً مسموحاً به فلكل جسم ، نظام زمنى محدد للحوادث التى تقع فى جيرته ، ومن الممكن أن يسمى هذا الزمان « الخاص » بهذا الجسم . وتجربتنا محكومة بالزمن الخاص لجسمنا . ولما كنا جميعاً ثابتين تقريباً على الأرض ، فإن الأزمان الخاصة بالكائنات البشرية المختلفة تتفق ، ومن الممكن جمعها معاً فى الزمان الأرضى . بيد أن هذا هو الزمان الوحيد المناسب للأجسام « الضخمة » على الأرض . فالأمر يحتاج بالنسبة لجسيمات بيتا (الإلكترونات) فى المعامل إلى أزمنة مختلفة تمام الاختلاف ، ولأننا نصر على استخدام زماننا الخاص ، تبدو لنا هذه الجسيمات وقد ازدادت كتلتها مع الحركة السريعة . والواقع أن كتلتها — من وجهة نظرها الخاصة — تظل ثابتة ، بينما نحن الذين نصير فجأة نحافاً أو ضخاما . وتاريخ الفزياء كما يشاهده جسم من جسيمات بيتا — أشبه برحلات جليفر .

ويثار الآن هذا السؤال : ما الذى تقيسه الساعة حقاً ؟ حين نتحدث عن ساعة فى نظرية النسبية لا نقصد الساعات التى صنعتها الأيدى الإنسانية ، وإنما نعنى أى شىء يؤدى عملا دورياً منتظماً . الأرض ساعة لأنها تدور مرة واحدة كل ثلاثة وعشرين ساعة وست وخمسين دقيقة . والذرة ساعة ، لأنها ترسل موجات ضوئية ذات ذبذبات محددة ، وهذه الموجات مرئية على صورة خطوط لامعة فى طيف الذرة . والعالم ملىء بالحوادث الدورية ، والآليات الأساسية كالذرات ، تبين تماثلا فذاً فى أجزاء الكون المختلفة . ويمكن استخدام أى حادث من هذه الحوادث الدورية لقياس الزمن ، والميزة الوحيدة التى تتمتع بها الساعات المصنوعة بأيدٍ إنسانية هى أنها من السهل مشاهدتها — على وجه الخصوص . ومع ذلك ، فإن بعض الساعات الأخرى أدق كثيراً . ونستخدم فى هذه الأيام الموجات اللاسلكية القصيرة المرسلة تحت ظروف معينة بوساطة ذرات السيزيوم وجزئيات الأمونيا (النوشادر) — لإرساء معايير من قياس الزمن أشد تجانسا من المقاييس المؤسسة على دوران الأرض . بيد أن السؤال يظل قائماً : إذا تخلينا عن الزمان الكونى ، فما هذا الذى يقاس حقيقة بوساطة « ساعة » بالمعنى الواسع الذى أعطيناه لهذه الكلمة ؟

كل ساعة تعطى قياساً مضبوطاً لزمانها « الخاص » وهذا الزمان كما سنرى فوراً عبارة عن كمية فزيائية هامة . ولكنها لا تعطى قياساًدقيقاً لأية كميةفزيائية مرتبطة بالحوادث التى تجرى على أجسام تتحرك حركة سريعة بالنسبة إليها . إنها تعطى معطية واحدة صوب اكتشاف كمية فزيائية مرتبطة بتلك الحوادث ، ولكننا نحتاج إلى معطية أخرى ، وهذه لابد من استخلاصهامن قياس المسافات فى الفضاء . والمسافات فى الفضاء — شأنها فى ذلك شأن فترات الزمان — ليست وقائع فزيائيةموضوعية — بوجه عام ، ولكنها تتوقف إلى حد ما على المشاهد . أما كيف يحدث هذا ، فأمر ينبغى شرحه الآن .

ينبغى علينا — أولا — أن نفكر فى المسافة القائمة بين حادثتين ، لا بين جسمين — وهذا يلزم على الفور مما قد وجدناه فيما يختص بالزمان . فلو أن جسمين يتحركان كل بالنسبة للآخر — وهذه هى الحالة دائماً حقاً — فإن المسافة بينهما ستتغير باستمرار ، بحيث إننا لا نستطيع أن نتحدث عن المسافة بينهما إلا فى وقت معين . وإذا كنت فى قطار مسافر صوب إدنبره ، فإننا نستطيع أن نتحدث عن المسافة بينك وبين إدنبره فى وقت معين . غير أن المشاهدين المختلفين — كما قلنا آنفاً — سيحكمون حكماً مختلفاً فيما يتعلق بنفس الوقت لحادثة وقعت فى القطار ، وحادثة وقعت فى إدنبره وهذا يجعل قياس المسافات نسبياً بنفس الطريقة التى وجدنا بها قياس الأزمان نسبياً . ونحن نعتقد عادة أن هناك نوعين منفصلين من الأبعاد بين حادثتين — بعد فى المكان وبعد فى الزمان : بين رحيلك عن لندن ووصولك إلى إدنبره هناك أربعمائة ميل وعشر ساعات . وقد رأينا فيما سبق أن مشاهداً آخر سوف يحكم على الزمان بطريقة مختلفة ، وأوضح من ذلك أنه سيحكم على المسافة حكماً مختلفاً . وإذا وجد مشاهد على الشمس فسوف يعتقد أن حركة القطار تافهة غاية التفاهة ، وسيقرر أنك قد قطعت المسافة التى قطعتها الأرض فى فلكها ودورانها اليومى . ومن وجهة أخرى ، فإن برغوثاً فى عربة القطار سيحكم بأنك لم تتحرك على الإطلاق فى المكان وإنما سيحكم بأنك قد أتممت له فترة من اللذة سيقيسها بزمنه « الخاص » لا بمرصد جرينتش . ولا يمكن أن يقال إنك وساكن الشمس أو البرغوث مخطئون : فلكل منكم ما يبرر حكمه ، ولكنه يكون مخطئاً ، إذا ما أضفى على مقاييسه الذاتية صحة موضوعية . وعلى هذا ،

ليست المسافة فى المكان بين حادثتين حقيقة فيزيائية فى ذاتها . ولكن هناك — كما سنرى فيما بعد — حقيقة فزيائية يمكن استنباطها من المسافة فى الزمان مع المسافة فى المكان . وهذا ما يسمى « فاصلا » فى المكان — الزمان .

وإذا أخذنا أية حادثتين فى الكون ، وجدنا أن هناك إمكانيتين مختلفتين بالنسبة للعلاقة بينهما . فقد يكون من الممكن فزيائياً لجسم ما أن يتحرك بحيث يكون حاضراً بالنسبة للحادثتين ، أو قد لا يكون حاضراً بالنسبة إليهما . وهذا يتوقف على حقيقة أنه لا وجود لجسم يمكن أن يتحرك بسرعة الضوء . فلنفترض مثلا أنه من الممكن إرسال ومضة من الضوء من الأرض ، وارتدت ثانية بعد أن عكسها القمر . (هذه تجربة أجريت فعلا ، ولكن بموجات الرادار التى تتحرك بالسرعة نفسها) فالزمن الذى ينقضى بين إرسال الومضة وعودة الانعكاس سيكون حوالى ثانيتين ونصف . ولهذا لا يستطيع جسم ما أن يتحرك بسرعة بحيث يكون حاضراً على الأرض خلال أى جزء من هاتين الثانيتين والنصف ، وأن يكون موجوداً على القمر فى لحظة وصول الومضة ، لأنه لكى يفعل ذلك فلا بد أن يتحرك الجسم بسرعة أكبر من سرعة الضوء . ولكن من الممكن — نظرياً — أن يوجد جسم على الأرض فى أية لحظة قبل أو بعد هاتين الثانيتين والنصف وأن يكون حاضراً أيضاً على القمر فى اللحظة التى وصلت فيها الومضة . وحين يكون من المحال فزيائياً أن يتحرك جسم ما بحيث يكون حاضراً فى الحادثتين، فإننا سنقول إن الفاصل[1] بين الحادثتين « مكانى » وحين يكون من الممكن فزيائياً أن يحضر جسم ما الحادثتين معاً ، فسنقول إن الفاصل بين الحادثتين «زمانى» وحين يكون الفاصل مكانيا، فإنه من الممكن لجسم ما أن يتحرك بطريقة تسمح لمشاهد موجود فوق الجسم أن يقرر أن الحادثتين وقعتا فى وقت واحد معا. وفى هذه الحالة، سيكون الفاصل بين الحادثتين هو ما يحكم مثل هذا المشاهد بأنه بالمسافة فى المكان بينهما. وحين يكون الفاصل «زمانيا» فإنه من الممكن لجسم ما أن يكون حاضراً بالنسبة للحادثتين معاً، وفى هذه الحالة يكون «الفاصل» بين الحادثتين هو ما يحكم المشاهد الموجود فوق الجسم بأنه الزمن المنقضى بينهما، أعنى، أنه زمانه

(١) سأضع تعريفاً لكلمة « فاصل » interval بعد لحظة (رسل) .

« الخاص » بين الحادثتين . وثمة حالة «حدّية» بين الحادثتين ، حين تكونان جزءين من ومضة ضوء واحدة ، أو إن صح هذا التعبير — حين تكون إحداهما المشاهدة للأخرى . وفى هذه الحالة يكون الفاصل بين الحادثتين صفراً .

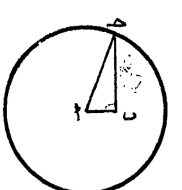
هناك إذن ثلاث حالات : (١) قد يكون من الممكن لشعاع من الضوء أن يكون حاضراً فى الحادثتين ، وهذا يحدث حينما كان أحدهما مشاهداً للآخر . وفى هذه الحالة يكون الفاصل بين الحادثتين صفراً . (٢) قد يحدث ألا يستطيع جسم ما أن يتحرك من حادثة إلى أخرى ، لأنه لكى يفعل ذلك ، لابد من أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء . وفى هذه الحالة ، يكون من الممكن دائماً من الوجهة الفزيائية أن يتحرك جسم ما بطريقة تسمح لمشاهد على هذا الجسم أن يحكم بأنه المسافة فى المكان بين الحادثتين . مثل هذا الفاصل نسميه « مكانيا » (٣) قد يكون من الممكن فزيائياً لجسم ما أن يتحرك بحيث يكون حاضراً فى الحادثتين ، وفى هذه الحالة سيكون الفاصل بينهما هو ما سيحكم به المشاهد الموجود فوق هذا الجسم على أنه الزمن المنقضى بينهما . مثل هذا الفاصل يسمى « زمانياً » .

والفاصل بين حادثتين حقيقة فزيائية عنهما ، ولا تتوقف على ظروف المشاهد الخاصة .

وهناك شكلان لنظرية النسبية ، الشكل الخاص . والشكل العام . والشكل الأخير هو بوجه عام تقريبى فحسب ، ولكنه يصبح قريباً جداً من الضبط فى المسافات البعيدة عن المادة الجاذبة gravitating matter . وحيثما أمكن إهمال الجاذبية ، أصبح فى الإمكان تطبيق النظرية الخاصة ، وبالتالى ، يمكن حساب الفاصل بين حادثتين حين نعرف المسافة فى المكان والمسافة فى الزمان بينهما ، وفقاً لتقدير أى مشاهد ، فإذا كانت المسافة فى المكان أكبر من المسافة التى يمكن أن يقطعها الضوء فى ذلك الوقت ، فإن الانفصال بينهما يكون « مكانياً » ، ويمكن لهذا التركيب . أن يعطينا « الفاصل » بين الحادثتين .

ارسم خطاً إ ب يكون طوله هو طول المسافة التى يمكن أن يقطعها الضوء فى

الزمان ، واجعل ا مركزاً لدائرة نصف قطرها هو المسافة فى المكان بين الحادثتين ، ومن نقطة ب ارسم الخط ب ج عمودياً على الخط ا ب بحيث يلتقى بالدائرة فى ج فيكون الخط «ب ج» هو طول الفاصل بين الحادثتين .



وحين تكون المسافة «زمانية» ، استخدم نفس هذا الشكل، ولكن اجعل ا ج هو المسافة التى يقطعها الضوء فى الزمان على حين يكون ا ب هو المسافة فى المكان بين الحادثتين. فالفاصل بينهما هو الآن الزمن الذى يستغرقه الضوء ليقطع المسافة ب ج .

وعلى الرغم من أن « ا ب » و « ا ج » مختلفان بالنسبة لمشاهدين مختلفين فإن « ب ج » هو الطول ذاته بالنسبة للمشاهدين جميعاً ، ولكنه قابل للتصحيحات التى تقوم بها النظرية العامة . فهو يمثل الفاصل الوحيد فى متصل المكان — الزمان الذى يحل محل الفاصلين فى المكان والزمان فى الفزياء القديمة . وقد تبدو فكرة « الفاصل» هذه غامضة إلى حدما حتى الآن ، ولكن ، كلما تقدمنا — بدت أقل غموضاً ، وسيظهر الداعى إليها فى طبيعة الأشياء تدريجياً .

الفصل الخامس

المكان - زمان

كل من سمع بالنسبية يعرف هذه العبارة متصل « المكان — زمان » ، أو « الزمكان » ويعرف أن الشيء الصحيح هو أن يستخدم هذه العبارة محل العبارة القديمة «المكان» و «الزمان» . بيد أن عدداً قليلاً من الناس الذين ليسوا من علماء الرياضة هم أولئك الذين لديهم فكرة واضحة عما يعنيه هذا التغيير فى المصطلح . وقبل أن أتعرض لمزيد من التفصيلات عن نظرية النسبية الخاصة ، أريد أن أنقل إلى القارئ ماتعنيه هذه العبارة الجديدة متصل « المكان — زمان » ، لأنها ، ربما كانت من وجهة النظر الفلسفية والتخيلية — أهم الابتكارات التى جاء بها أينشتين .

فلنفترض أنك تريد أن تقول أين وقعت حادثة معينة ، ولتكن انفجاراً على منطاد — فسوف تذكر أربعة مقادير ، هى خط الطول وخط العرض والارتفاع فوق سطح الأرض والزمان .. والمقادير الثلاثة الأولى - وفقاً للنظرية التقليدية - هى التى تحدد الوضع فى المكان ، بينما المقدار الرابع هو الذى يعطى الوضع فى الزمان . ويمكن تحديد المقادير الثلاثة التى تعطى الوضع فى المكان بمختلف الطرق ، فمن الممكن مثلا أن تأخذ مستوى خط الاستواء ، ومستوى خط الزوال فى جرينتش ، ومستوى خط تسعين° ، وتقول أين كان المنطاد من كل من هذه المستويات الثلاث وتكون هذه المسافات الثلاث هى ماتسمى «الإحداثيات — الديكارتية» نسبة إلى ديكارت. كما يمكنك أن تأخذ أية ثلاثة مستويات متعامدة كل على الآخر ، فيكون لديك دائماً «الإحداثيات الديكارتية» . أو قد تستطيع أن تأخذ المسافة من لندن إلى أية نقطة رأسية تحت المنطاد ، واتجاه هذه المسافة (شمال شرقى أو غربى ، جنوب غربى أو أى شىء كان) وارتفاع المنطاد عن الأرض . فهناك عدد لانهائى من مثل هذه الطرق لتحديد الوضع فى المكان ، وكلها طرق مشروعة على حد سواء ، واختيار إحداها سيكون لمجرد إيثار السهولة .

وحين كان الناس يقولون إن للمكان ثلاثة أبعاد ، فقد كانوا يعنون هذا بالضبط : أن ثلاثة مقادير لازمة لتخصيص موقع نقطة مافى المكان ، أما المنهج الخاص بتحديد هذه المقادير فكان تحكمياً تماماً .

أما فيما يتعلق بالزمان ، فقد كان من المعتقد أن هذه المسألة مختلفة تمام الاختلاف . ذلك أن العناصر التحكمية الوحيدة فى تسجيل قياس الزمان كانت هى الوحدة ، ونقطة الزمان التى بدأ منها التقدير : Reckoning ، فمن الممكن أن يقيس المرء بتوقيت باريس ، أو بتوقيت نيويورك ، وهذا موضع اختلاف بالنسبة لنقطة البداية . وكذلك يستطيع المرء أن يقيس الوقت بالثوانى أو الدقائق أو الساعات أو الأيام أو الأعوام ، وهذا اختلاف فى الوحدة . وهاتان مسألتان واضحتان وتافهتان فى الوقت نفسه . فليس هناك مايقابل حرية الاختيار فى منهج تحديد الوضع فى المكان . وكان من المعتقد — على وجه الخصوص — أن منهج تحديد الوضع فى المكان ومنهج الوضع فى الزمان — يمكن أن يكونا مستقلين أحدهما عن الآخر استقلالا تاماً . ولهذه الأسباب كان الناس ينظرون إلى الزمان والمكان على أنهما متمايزان تمام التمايز .

وقامت نظرية النسبية بتغيير هذا الرأى . فثمة الآن عدد من الطرق المختلفة لتحديد الوضع فى الزمان ، وهذه الطرق لا تختلف فيما بينها من حيث الوحدة ونقطة البداية فحسب . فالحق أنه — إذا كانت حادثة قد وقعت فى نفس الوقت مع حادثة أخرى — كما سبق أن رأينا — فى تقدير زمانى ما ، فإنها ستسبقها فى تقدير آخر ، وستتبعها فى تقدير ثالث . وفضلا عن ذلك فإن تقديرات المكان والزمان لم تعد مستقلة الواحد عن الآخر . وإذا أنت غيرت طريقة تقدير الوضع فى المكان ، فقد تستطيع أيضاً أن تغير الفترة الزمنية بين حادثتين . وإذا أنت غيرت طريقة تقدير الزمان ، فإنك تستطيع أيضاً أن تغير المسافة فى المكان بين حادثتين . وهكذا لم يعد المكان والزمان مستقلين أحدهما عن الآخر ، شأنهما فى ذلك شأن أبعاد المكان الثلاثة . ونحن ما نزال فى حاجة إلى أربعة مقادير لتحديد وضع حادثة ما ، ولكننا لانستطيع — كما كان الحال من قبل — أن نفصل واحداً من هذه المقادير الأربعة بوصفه مستقلا تمام الاستقلال عن المقادير الثلاثة الأخرى .

ولم يعد من الصدق تماما أن تقول إنه لم يعد تمييز بين الزمان والمكان . فهناك كما رأينا فواصل « زمانية » و « فواصل » مكانية . بيد أن التمييز من نوع يختلف عما افترضناه سابقاً . فلم يعد هناك وقت كلى universal يمكن تطبيقه بلا لبس على أى جزء من أجزاء العالم ، وإنما توجد فحسب « أزمنة » خاصة مختلفة لأجسام متباينة فى الكون . ويتفق بالتقريب بالنسبة لجسمين لا يتحركان حركة سريعة ، ولكنه لا يتفق بالضبط مطلقاً إلا بالنسبة لجسمين يكونان ساكنين الواحد بالنسبة إلى الآخر .

وصورة العالم المطلوبة فى مثل هذه الأحوال الجديدة هى كالآتى :

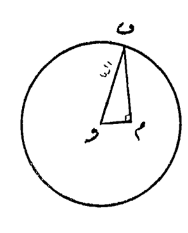
فلنفترض أن حادثة « د » قد وقعت لى ، وفى الوقت نفسه انبعثت منى ومضة من الضوء فى جميع الاتجاهات . فأى شىء يحدث لأى جسم بعد أن بلغه الضوء من الومضة ، يكون بالتحديد بعد وقوع الحادث « د » فى أى نظام لتقدير الوقت . وأية حادثة وقعت فى أى مكان وأستطيع أن أشاهدها قبل أن تقع لى الحادثة « د » ، هى بالتحديد قد وقعت قبل الحادثة « د » فى أى نظام لتسجيل الوقت . بيد أن أية حادثة وقعت فى الوقت المنقضى بينهما ليست بالتحديد قبل أو بعد الحادثة « د » . ولكى تحدد المسألة : افترض أننى أستطيع أن أشاهد شخصاً فى الشعرى اليمانية ، وأنه يستطيع أن يشاهدنى ، فكل مايفعله ، وما أراه قبل أن تقع الحادثة « د » لى ، هو بالتحديد قبل « د » . وكل مايفعله بعد أن شاهد الحادثة « د » هو بالتحديد بعد « د » . [غير أن كل مايفعله يكون قبل أن يرى الحادثة « د » ، ولكننى أراه أنا بعد أن وقعت الحادثة « د » ليس بالتحديد قبل أو بعد « د » ، وما دام الضوء يستغرق سنين طويلة لينتقل من الشعرى اليمانية إلى الأرض ، فإن هذا يعطى فترة من الأعوام ضعف الوقت فى الشعرى اليمانية يمكن أن نسميها « معاصرة » للحادثة « د » ، مادامت هذه السنين ليست بالتحديد قبل أو بعد « د »]

ولقد اقترح الدكتور أ . أ . روب A. A. Robb فى كتابه « نظرية المكان والزمان » وجهة نظر ، قد تكون — وقد لا تكون — أساسية من الوجهة الفلسفية ، ولكنها تساعد على أية حال — فى فهم حالة الأشياء التى وصفناها آنفاً . فقد ذهب إلى أنه من الممكن فحسب القول بأن حادثة ما قد وقعت بالتحديد « قبل »

حادثة أخرى ، إذا أثرت على هـذه الحادثة بطريقة ما . والآن ، تنتشر المؤثرات من المركز بسرعات متفاوتة . وتمارس الصحف تأثيراً ينبعث من لندن بسرعة متوسطة مقدارها حوالى عشرين ميـلا فى الساعة . وقد تكون أكثر من ذلك بالنسبة للمسافات الطويلة . وكل ما يفعله إنسان ما بسبب ما قرأه فى الصحيفة هو بكل وضوح تال على طبع الصحيفة . والأصوات تتحرك أسرع من ذلك كثيراً : ومن الممكن ترتيب مجموعة من مكبرات الأصوات على طول الطرق الرئيسية ، على أن يذيع كل منها أخبار الصحف للمكبر الذى يليه . بيد أن البرق (التلغراف) أسرع ، والبرق اللاسلكى ينتقل بسرعة الضوء ، ولهـذا لا يمكن المرء أن يأمل فيما هو أسرع من ذلك . والآن، مايفعله إنسان نتيجة لتلقيه برقية لاسلكية يفعله « بعد » إرسال البرقية ، والمعنى هنـا مستقل تمام الاستقلال عن المواصفات بالنسبة لقياس الزمن . بيد أن كل مايفعله فى الوقت الذى تكون فيه البرقية فى طريقها إليه ، لا يمكن أن يتأثر بإرسال البرقية ، ولا يمكن أن يؤثر على الراسل إلا بعد إنقضاء وقت قصير بعد أن أرسل البرقية ، أعنى أنه إذا كان هناك جسمان منفصلان انفصالا بعيداً ، فإن أحدهما لا يستطيع أن يؤثر فى الآخر إلا بعد مرور فترة معينة من الوقت . وما يحدث قبل انقضاء هذا الوقت لا يمكن أن يؤثر على الجسم البعيد . فلنفرض أن حادثاً هاماً قد وقع للشمس : فهناك فترة من الزمن مقدارها ستعشرة دقيقة على الأرض لاتتأثر خلالها أية حادثة على الأرض أو يمكن أن تتأثر بتلك الحادثة الهامة المذكورة التى وقعت على الشمس ، وهذا يمنحنا أساساً جوهرياً للنظر إلى فترة الست عشرة دقيقة المنقضية على الأرض بأنها ليست قبل أو بعد الحادثة التى وقعت على الشمس .

ومفارقات نظرية النسبية الخاصة ليست مفارقات إلا لأننا لم نألف وجهة النظر هذه ، وإلا لأننا اعتدنا أن نأخذ الأشياء كما هى ، على حين أننا لا نملك الحق فى أن نفعل ذلك . وهذا يصدق ــ بوجه خاص ــ فيما يتعلق بقياس الأطوال . ففى الحياة اليومية ، الطريقة التى تتبعها فى قياس الأطوال هى أن نستخدم مسطرة أو أى مقياس آخر . وفى اللحظة التى نستعمل فيها المسطرة فإنها تكون ساكنة بالنسبة للجسم الذى نقيسه . وبالتالى فإن الطول الذى نصـــل إليه بالقياس هو الطول «المناسب» أعنى الطول كما يقدره مشاهد يشارك فى حركة الجسم. ولم تتعرض

قط فى حياتنا العادية، لمشكلة قياس جسم فى حركة مستمرة . وحتى لو فعلنا ذلك ، فإن سرعات الأجسام المرئية على الأرض ضئيلة بالنسبة الأرض إلى درجة لا تظهر معها الشذوذات التى تعالجها النظرية النسبية . بيد أننا فى الفلك ، أو فى البحث الخاص بالتركيب الذرى ، تواجهنا مشكلات لا يمكن علاجها بهذه الطريقـــة . ولأننا لسنا يوشع، فإننا لانستطيع أن نوقف الشمس أثناء قياسنا لها ، وإذا كان علينا أن نقدر حجمها ، فلا بد أن نفعل ذلك أثناء حركتها بالنسبة إلينا. وكذلك إذا أردت أن تقدر حجم إلكترون فلا بد أن تفعل ذلك أثناء حركته السريعة لأنه لا يقف ساكناً لحظة واحدة أبداً ، وهذا هو نوع المشكلة الذى تعنى به نظرية النسبية . والقياس بمسطرة ، حين يكون ذلك ممكناً ، يعطى دائماً نفس النتيجة ، لأنه يعطى الطول « المناسب » للجسم ، ولكن ، حين لا يكون هذا المنهج ممكناً ، فإننا نجد أن أشياء عجيبة تحدث ، وخاصة إذا كان الجسم المطلوب قياسه يتحرك بسرعة كبيرة بالنسبة للمشاهد، وقد يساعدنا شكل شبيه بالشكل الموجود فى نهاية الفصل السابق على فهم هذه الأحوال .



فلنفرض أن الجسم الذى نريد أن نقيس أطواله يتحرك بالنسبة إلينا ، وأنه فى ثانيـــة واحدة يتحرك المسافة « وم » . فلنرسم دائرة حول « و » يكون نصف قطرها هو المسافة التى يقطعها الضوء فى ثانية ومن « م » أقم الخط « ب » عمودياً على و م ويلتقى بالدائرة فى ب ، وهكذا تكون وب هى المسافة التى يقطعها الضوء فى ثانية.

وتكون نسبة «وب» إلى « و م » هى نسبة سرعة الضوء إلى سرعة الجسم . ونسبة و ب إلى م ب هى النسبة التى تتغير بها الأطوال الظاهرة نتيجة للحركة ، أى أنه إذا حكم المشاهد بأن نقطتين فى خط الحركة على الجسم المتحرك يبعدان بمسافة يمثلها الخط م ب ، فإن شخصاً يتحرك مع الجسم سيحكم بأنهما كانتا على مسافة يمثلها (على نفس المستوى) الخط و ب . ولا تتأثر بالحركة المسافات الموجودة على الجسم المتحرك والتى تكون على زوايا قائمة بالنسبة لخط الحركة . والمسألة كلها تبادلية أى أنه إذا قام مشاهد يتحرك مع الجسم بقياس الأطوال الموجودة على

جسم المشاهد السابق ، فإنها تتغير بنفس النسبة . وحين يتحرك جسمان كل منهما بالنسبة إلى الآخر ، فإن أطوال كل منهما تبدو أقصر إلى الآخر منها إلى نفسها . وهذه هي نظرية فتزجيرالد فى التقلص التى اخترعها ليفسر نتيجة تجربة ميكلسون ـ مورلى ، ولكنها تظهر الآن بصورة طبيعية من هذه الحقيقة وهي أن المشاهدين لا يحكمان حكماً واحداً على الآنية .

والطريقة التى تتدخل بها الآنية هى هذه : نحن نقول إن نقطتين على جسم ما يبعدان مسافة قدم حين نستطيع أن نستخدم طرف مسطرة على نقطة وطرفها الآخر على النقطة الأخرى — وفى وقت واحد معاً . فإذا لم يتفق شخصان على الآنية ، ويكون الجسم فى حركة ، فمن الواضح أنهما سيحصلان على نتائج مختلفة من قياساتهما . وهكذا تكمن المتاعب الخاصة بالزمان فى أعماق المتاعب الخاصة بالمكان .

ونسبة و ب إلى م ب هى الشىء الجوهرى فى هذه المسائل جميعاً . فالأزمنة والأطوال والكتل تتغير كلها بهذه النسبة حين يكون الجسم المعنى فى حركة بالنسبة للشاهد . وسيكون من المشاهد أنه إذا كانت « و م » أصغر كثيراً من « و ب » أى أن الجسم المتحرك أبطأ كثيراً من سرعة الضوء ، فإن « م ب » ، « و ب » سيكونان متساويين تقريباً . بحيث أن التعديلات التى تحدثها الحركة ستكون ضئيلة جداً . ولكن إذا كان « و م » يكاد يكون طويلا طول « و ب » ، أى إذا كان الجسم يتحرك بسرعة أقرب إلى سرعة الضوء ، فإن م ب يصبح قصيراً جداً إذا قيس بالخط و ب ، وتصبح التأثيرات عظيمة جداً . وقد لوحظت الزيادة الظاهرة فى الكتلة بالنسبة للجزيئات المتحركة حركة سريعة جداً ، كما أمكن العثور على المعادلة الصحيحة ، قبل أن يخترع أينشتين نظريته الخاصة فى النسبية . والواقع ، أن « لورنتس » توصل إلى المعادلات المسماة بتحويل لورنتس ، وهى المعادلات التى تتضمن الجوهر الرياضى كله لنظرية النسبية الخاصة . غير أن أينشتين هو الذى أثبت أن المسألة كلها هى ما ينبغى أن ننتظره ، لا مجرد مجموعة من الحيل التى تفسر النتائج التجريبية العجيبة . ومع ذلك ، ينبغى ألا ننسى أن النتائج التجريبية هى الدافع الأصلى للنظرية كلها ، وأنها ظلت الأساس للقيام بإعادة البناء المنطقى الهائل الذى تطلبته نظريات أينشتين .

نستطيع الآن أن نلخص الأسباب التى جعلت من الضرورى إحلال عبارة متصل « المكان — زمان » بدلا من « المكان والزمان »؛ فالفصل القديم بين المكان والزمان يقوم على إعتقاد بأنه لا لبس هناك فى أن نقول إن حادثتين فى مكانين متباعدين قد وقعتا فى زمن واحد بعينه، وبالتالى كان من المعتقد أننا نستطيع وصف « طبوغرافية » (وضع) الكون فى لحظة معينة بمصطلحات مكانية بحتة. ولكن بعد أن أصبحت الآنية منسوبة إلى مشاهد معين، لم يعد ذلك ممكناً. فما يعده مشاهد ما وصفاً لحالة العالم فى لحظة معينة، هو بالنسبة مشاهد آخر سلسلة من الحوادث وقعت فى أزمنة مختلفة، وليست علاقاتها مكانية فحسب، بل زمانية أيضاً. ولهذا السبب نفسه، نحن معنيون بالحوادث، لا بالأجسام. وقد كان من الممكن فى النظرية القديمة النظر إلى عدد من الأجسام، كلها فى نفس اللحظة، وما دام الزمان واحداً بالنسبة إليها جميعاً، فمن الممكن تجاهله. أما الآن، فإننا لا نستطيع أن نفعل ذلك إذا أردنا الحصول على تفسير موضوعى للوقائع الفزيائية. فلا بد أن نذكر التاريخ الذى ننظر فيه إلى الجسم، وبهذا نصل إلى « حادثة »، أى إلى شىء يحدث فى زمن معين. وحين نعرف زمان ومكان حادثة ما فى نظام تسجيلى لمشاهد فإننا نستطيع أن نحسب زمانها ومكانها وفقاً لمشاهد آخر. بيد أنه ينبغى علينا أن نعرف الزمان والمكان أيضاً لأننا لم نعد نستطيع أن نسأل ما هو مكانها بالنسبة لمشاهد الجديد فى « نفس » الوقت بالنسبة للمشاهد القديم. وليس هذا شيئاً كنفس الزمان بالنسبة للمشاهدين المختلفين، اللهم إلا إذا كانوا ثابتين الواحد بالنسبة للآخر. ونحن نحتاج إلى أربعة قياسات لتحديد وضع ما، وأربعة قياسات تحدد وضع حادثة ما فى متصل « المكان زمان » لا مجرد جسم فى المكان. ولا تكفى ثلاثة قياسات لتحديد أى وضع. هذا هو جوهر ما نعنيه باستبدال متصل « المكان — زمان » بالمكان والزمان.

الفصل السادس

نظرية النسبية الخاصة

قامت نظرية النسبية الخاصة بوصفها طريقة لتفسير وقائع الكهرومغناطيسية. ولدينا فى هذا المجال تاريخ عجيب . ففى القرن الثامن عشر ، وأوائل القرن التاسع عشر ، كانت نظرية الكهرباء تسودها المماثلة النيوتينية سيادة تامة . فالشحنتان الكهربائيتان تجذب إحداهما الأخرى إذا كانت كل منهما من نوع مختلف ، أى حين تكون إحداهما موجبة ، والأخرى سالبة ، ولكنهما تتنافران إذا كانتا من نفس النوع . وفى كل حالة ، تختلف القوة وفقاً لعكس مربع المسافة ، كما هى الحال فى الجاذبية . وكانت هذه القوة متصورة على أنها فعل عن بعد ، حتى أثبت فاراداى بعدد من التجارب البارعة — تأثير الوسط بينهما . ولم يكن فاراداى عالم رياضة ، وكان كلارك مكسويل هو أول من أعطى شكلا رياضياً للنتائج التى توحى بها تجارب فاراداى . وفضلا عن ذلك ، أعطى كلارك مكسويل أسسا للتفكير بأن الضوء ظاهرة كهرومغناطيسية تتألف من موجات كهرومغناطيسية . ومن الممكن إذن أن يؤخذ الوسط الذى تنتقل فيه المؤثرات الكهرومغناطيسية على أنه الأثير ، الذى افترض منذ عهد بعيد على أنه المجال الذى ينتقل فيه الضوء . وثبتت صحة نظرية مكسويل عن الضوء بوساطة تجارب « هرتس » فى إنتاج موجات كهرومغناطيسية ، ووضعت هذه التجارب أساس التلغراف اللاسلكى . وإلى هنا ، لدينا سجل حافل بالتقدم الظاهر ، تتبادل فيه النظرية والتجربة دور الزعامة . وكان يبدو أن الأثير فى العصر الذى قام فيه هرتس بتجاربه — قد استقر مطمئناً ، وأصبح فى مركز قوى كأى فرض علمى آخر لا سبيل إلى التحقق من صدقه تحققاً مباشراً . بيد أن مجموعة جديدة من الوقائع بدأت تكتشف ، وأخذت الصورة تتغير تدريجياً جملة وتفصيلا .

كانت الحركة التى بلغت ذروتها بهرتس حركة تريد أن تجعل كل شىء متصلا :

الأثير متصل ، والموجات متصلة . وكان من المأمول أن تكون المادة مكونة من تركيب متصل فى الأثير . ولكن جاء اكتشاف التركيب الذرى للمادة ، بل التركيب المنفصل للذرات نفسها وكان من المعتقـــد أن الذرات مكونة من الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات . والإلكترون عبارة عن جزىء صغير يحمل شحنة محددة من الكهرباء السالبة ، أما البروتون فيحمل شحنة محددة من الكهرباء الموجبة ، بينما لا يحمل النيوترون أية شحنة (إنها مسألة عادة فحسب أن تسمى الشحنة التى يحملها الإلكترون سالبة والشحنة التى يحملها البروتون موجبة لا العكس) ، وكان يبدو محتملا أن الكهرباء لا توجـد إلا على هيئة شحنات على الإلكترون والبروتون ، وتحمل الإلكترونات جميعاً نفس الشحنة السالبة تماماً ، وكذلك تحمل كل البروتونات نفس الشحنة الموجبة المضادة المتساوية تماماً . واكتشفت فيما بعد جسيمات ثانوية ذرية أخرى ، ويسمى معظمها ميزونات أو هيبيرونات hyperons . وتزن البروتونات جميعاً وزناً واحداً بالضبط ، فهى حوالى ١٨٠٠ ضعف وزن الإلكترون . وكذلك تزن النيوترونات جميعاً نفس الوزن بالضبط ، وهى أثقل قليلا من البروتونات . أما الميزونات التى يوجد منها عدة أنواع مختلفة ، فهى أثقل من الإلكترونات ، ولكنها أخف من البروتونات ، بينما الهيبيرونات أثقل من البروتونات أو النيوترونات .

وتحمل بعض الجسيمات شحنات كهربائية بينما لا تحمل الأخرى أية شحنات . وقد وجد أن الجسيمات التى تحمل شحنات موجبة تحمل نفس الشحنة التى يحملها البروتون ، بينما تحمل كل الجسيمات المحملة بشحنة سالبة نفس الشحنة التى يحملها الإلكترون ، على الرغم من أنها تختلف فى صفاتها الأخرى تمام الاختلاف . ومما يزيد المسألة تعقيداً أن هناك جسيماً يماثل الإلكترون ، ولا يختلف عنه إلا فى أنه يحمل شحنة موجبة بدلا من شحنة سالبة ، ويسمى البوزيترون positron وقد اكتشف حديثاً جداً جسيم يماثل البروتون ، وكل الفرق بينهما هو أنه يحمل شحنة سالبة ، وقد أطلق عليه اسم « البروتون — المضاد » anti-proton .

ولا تنفصل هذه الكشوف عن التركيب المنفصل للمادة عن تلك الكشوف المسماة بظاهرة الكم quantum phenomena كالخطوط اللامعة فى طيف الذرة ،

ويبدو أن جميع العمليات الطبيعية تكشف عن انفصال أساسى حيثما أمكن قياسها بدقة كافية.

وهكذا، كان على الفزياء أن تهضم حقائق جديدة، وأن تواجه مشكلات جديدة. وعلى الرغم من أن نظرية الكم قد وجدت بصورتها الحالية ثلاثين عاما، ووجدت نظرية النسبية الخاصة خمسين عاماً، فإن التقدم الجوهرى فى الربط بينهما لم يتم إلا فى وقت حديث جداً. وجعلت التطورات الحديثة فى نظرية الكم أكثر اتساقاً مع النسبية، وأعانتنا هذه التحسينات على فهم الجسيمات الذرية الثانوية إلى حد كبير، بيد أن كثيراً من الصعوبات الخطيرة مابرحت قائمة.

ولقد انطبعت المشكلات التى حلت بوساطة نظرية النسبية الخاصة فى مجالها الخاص، بمعزل عن نظرية الكم، بطابع تجربة ميكلسون — مورلى، وعلى افتراض صحة نظرية مكسويل فى الكهرومغناطيسية، كان لابد من ظهور مؤثرات مكتشفة معينة للحركة خلال الأثير، والواقع، أنه لم توجد أية مؤثرات. ثم جاءت هذه الحقيقة الملحوظة وهى أن الجسم المتحرك حركة سريعة جداً يبدو أن كتلته تزداد. والزيادة تكون بنسبة «و ب» إلى «م ب» فى الشكل الموجود فى الفصل السابق. وتراكمت حقائق من هذا النوع تدريجياً حتى أصبح من الضرورى العثور على نظرية تفسر هذه الحقائق جميعاً.

وقد حوات نظرية مكسويل نفسها إلى معادلات معينة تعرف باسم «معادلات مكسويل». ولقد ظلت هذه المعادلات صامدة فى وجه جميع الثورات التى اجتاحت الفزياء فى القرن الأخير، والحق أنها قد ازدادت أهمية، كما ازدادت يقيناً، ذلك أن حجج مكسويل لتأييدها كانت مهزوزة إلى درجة لابد معها من إرجاع صحة نتائجه إلى «الحدس» intuition. وقد أمكن الحصول على هذه المعادلات بالطبع، من تجارب أجريت فى معامل أرضية، بيد أنه كان هناك افتراض ضمنى بأن حركة الأرض خلال الأثير يمكن تجاهلها. وفى بعض الحالات — كما هى الحال فى تجربة ميكلسون مورلى — لم يكن هذا ممكناً، إلا بوقوع

خطأ يمكن قياسه ، غير أن الأمر تكشف عن أن ذلك من الممكن دائماً . وقد ووجه الفزيائيون بصعوبة غريبة هي أن معادلات مكسويل أدق مما ينبغي أن تكون عليه وقد شرح جاليليو صعوبة مماثلة لهذه الصعوبة أشد المماثلة في مستهل الفزياء الحديثة فمعظم الناس يعتقدون أنك إذا تركت ثقلا يسقط ، فإنه يسقط عمودياً . ولكن ، لو أنك قمت بهذه التجربة في قمرة سفينة متحركة ، فإن الثقل يسقط بالنسبة للقمرة ، وكأن السفينة ثابتة ، أي أنه لو بدأ مثلا من منتصف السقف ، فإنه يسقط وسط الأرضية ، وهذا معناه أنه من وجهة نظر مشاهد على الشاطىء لايسقط عمودياً ، مادام يشارك السفينة في حركتها . وطالما كانت حركة السفينة منتظمة ، فإن كل ما يحدث داخل السفينة يحدث كما لو كانت السفينة لاتتحرك ، وقد فسر جاليليو كيف يحدث هذا ، مما أثار استنكار تلاميذ أرسطو الشديد . وفي الفزياء التقليدية — المستمدة من جاليليو ، ليس للحركة المتجانسة في خط مستقيم تأثيرات يمكن استكشافها . وقد كان ذلك — في يومها — شكلا باعثاً على الدهشة من النسبية كما كانت نسبية أينشتين بالنسبة إلينا . وقد شرع أينشتين في نظرية النسبية الخاصة في العمل ليبين كيف يمكن ألا تتأثر الظواهر الكهرومغناطيسية بالحركة المنتظمة خلال الأثير — إذا كان ثم أثير . وهذه مشكلة أشد صعوبة ، مشكلة لاسبيل إلى حلها بمجرد اعتناق مبادىء جاليليو .

وقد كان المجهود العسير الذي يتطلبه حل هذه المشكلة ، يتعلق بالزمان ، إذ كان من الضروري إدخال فكرة الزمان « الخاص » التي تناولناها آنفاً ، وأن تتخلى عن الاعتقاد القديم في زمان كلي واحد . وقد تم التعبير عن القوانين الكمية للظواهر الكهرومغناطيسية في معادلات مكسويل . وقد وجد أن هذه المعادلات صادقة بالنسبة لأي مشاهد ، أياً كان ، متحرك . وأنها لجد مشكلة رياضية صرفة أن نكتشف ماهي الفروق التي ينبغي أن تكون بين المقاييس التي يستخدمها مشاهد ، والمقاييس التي يستخدمها آخر ، إذا وجدا — أنه على الرغم من حركتهما الواحد بالنسبة للآخر — نفس المعادلات وقد تحقق صدقها . والحل متضمن في « تحويل لورنتس » الذي وجده لورنتس بوصفه معادلة ، ولكنه فسر ووضح بوساطة أينشتين .

ويخبرنا تحويل لورنتس : ماهو تقدير المسافات ومدد الزمان التى يمكن أن يقوم بهما مشاهد معروفة حركته النسبية ، عندما تعطى لنا المسافات والفترات الزمانية لمشاهد آخر . فلنفترض أنك فى قطار يسير على خط حديدى ويتجه شرقاً ، وقد ظللت مسافراً فترة من الزمن ، قدرته ساعات المحطة التى بدأت منها بـ « ن » وعلى مسافة « م » من نقطة بدايتك — كما قام بقياسها الأشخاص لموجودون على الخط — وقع حادث فى هذه اللحظة ولتكن هذه الحادثة أن البرق قد أصاب الخط الحديدى . وقد كنت مسافراً طيلة الوقت بسرعة متجانسة هى « س » . والسؤال هو : على أى بعد منك ستحكم بأن الحادثة قد وقعت ، وبعد أى زمن من شروعك فى السفر ستكون بوساطة ساعتك ، على افتراض أن ساعتك مضبوطة ، من وجهة نظر مشاهد على القطار ؟

وعلى حلنا لهذه المشكلة أن يفى بشروط معينة . فعليه أن يظهر هذه النتيجة وهى أن سرعة الضوء واحدة بالنسبة للمشاهدين جميعاً ، أياً كانت حركتهم . وعليه أن يجعل الظواهر الفزيائية — وعلى الأخص ظواهر الكهرومغناطيسية تخضع لنفس القوانين بالنسبة للشاهدين المختلفين ، مهما وجدوا أن مقاييسهم للمسافات والأزمنة متأثرة بحركتهم . وعليه أن يجد مثل هذه المؤثرات جميعاً على القياس متبادلة، أى أنك لو كنت فى قطار، كانت حركتك تؤثر على تقديرك للمسافات خارج القطار ، فلا بد أن يكون هناك تغيير مماثل تماماً فى التقدير الذى يقوم به الأشخاص خارج القطار للمسافات داخله . وهذه الشروط كافية لتحديد حل المشكلة . غير أن منهج الحصول على الحل لا يمكن تفسيره إلا بمزيد من الرياضة لا يتيحه الكتاب الحالى .

وقبل أن نتناول المسألة فى عبارات عامة ، دعنا نأخذ مثلا : فلنفترض أنك فى قطار على خط حديدى مستقيم طويل ، وأنك مسافر صوب الشرق بسرعة تعادل ثلاثة أخماس سرعة الضوء. فلنفترض أنك قست طول قطارك، فوجدت أنه مائة ياردة . ولنفترض أن الأشخاص الذين يدركون منك لمحة أثناء عبورك ، ينجحون بوساطة المناهج العلميه البارعة فى تسجيل مشاهـــدات تمكنهم من حساب طول قطارك . وإذا قاموا بعملهم قياما صحيحاً ، فإنهم سيجدون أن هذا

الطول عبارة عن ثمانين ياردة . إذ سيبدو لهم كل ما فى القطار أقصر فى اتجاه القطار، عما يبدو لك ، وستبدو أطباق المائدة التى تراها على أنها أطباق دائرية عادية — ستبدو للشاهد الخارجي وكأنها بيضاوية : ستبدو فى أربعة أخماس عرضها فحسب فى الاتجاه الذى يتحرك فيه القطار كما تبدو فى اتجاه عرض القطار ، وكل هذا تبادلى. فلنفترض أنك تشاهد خارج النافذة رجلا يحمل قضيباً لصيد السمك ، يبلغ طوله بقياسه هو خمسة عشر قدماً ، فلو أنه كان يمسكه عمودياً مستقيماً ، فسوف تراه كما يراه هو ، وستراه أيضاً كذلك إذا كان يمسك به أفقياً ولكنه متعامد مع القطار، ولكن إذا كان يشير به إلى الخط الحديدى ، فسيبدو لك أن طوله ١٢ قدماً فحسب، ذلك أن جميع الأطوال فى اتجاه الحركة تنقص بنسبة ٢٠٪ سواء بالنسبة لأولئك الذين ينظرون إلى داخل القطار من الخارج أو بالنسبه لمن ينظر إلى خارج القطار من الداخل .

بيد أن الآثار المتعلقة بالزمان أعجب من ذلك . وقد شرح إدنجتون هذه المسألة فى كتابه « المكان والزمان والجاذبيـة » شرحاً مثالياً فى وضوحه . فقد افترض أن طياراً يطير بسرعة ١٦١,٠٠٠ ميلا فى الثـانية بالنسبة للأرض ، ثم يقول :

« لو أننا شاهدنا الطيار بعناية ، فسوف نستنتج أنه بطيء بطئاً غير عادى فى حركاته ، وستكون الحوادث المصاحبة له فى حركته بطيئة بطئاً مماثلا — وكأنما نسى الزمان أن يجرى. فسيجاره يبقى ضعف الوقت الذى يبقاه سيجار من سجائرنا. وقد قلت « نستنتج » عن قصد ، و « سنرى » بطئاً أشد مبالغة فى الزمان ، بيد أن هذا من اليسير تفسيره ، لأن الطيار يزيد من المسافة التى بيننا بسرعة ، وانطباعات الضوء تستغرق وقتاً أطول وأطول لكى تصل إلينا. ويبقى التأخر الأشد اعتدالا المشار إليه بعد أن يحسب حساب انتقال الضوء . غير أن التبادل يتدخل هنا مرة ثانية ، لأننا نحن الذين نتحرك — فى نظر الطيار — بسرعة ١٦١,٠٠٠ ميلا فى الثانية ، وحين يضع فى حسبانه كافة الاعتبارات ، يجد أننا نحن المبطئون : وأن سيجارنا هو الذى يدوم ضعف سيجاره » .

ياله من موقف لا نحسد عليه إ كل يعتقد أن سيجار الآخر يدوم ضعف سيجاره.

وقد يكون من دواعي العزاء — على كل حال — أن زيارات الآخر للطبيب تدوم أيضا بنسبة الضعف !

ومسألة الزمان هذه مسألة معقدة ، نظراً لأن الحوادث التى يراها شخص ما على أنها وقعت فى وقت واحد ، يراها الآخر منفصلة بعضها عن البعض الآخر بفترة من الزمن .. ولكى أحاول توضيح كيفية تأثر الزمان ، سأعود إلى قطارنا الذى يسافر متجهاً إلى الشرق بسرعة تعادل ثلاثة أخماس سرعة الضوء . وسأفترض زيادة فى التوضيح — أن الأرض كبيرة مستوية ، بدلا من أن تكون صغيرة مكورة .

فلو أننا أخذنا الحوادث التى تقع فى نقطة محددة على الأرض وسألنا أنفسنا كيف ستبدو بعد بداية الرحلة بالنسبة للمسافر من حيث طولها الزمنى ، والإجابة هى أنه سيكون هناك ذلك الإبطاء الذى يتحدث عنه إدنجتون ، وهذا معناه فى هذه الحالة ، أن ما يبدو ساعة فى حياة الشخص الساكن سيحكم عليه الرجل الذى يلاحظه من القطار على أنه ساعة وربع . وبالتبادل ، ما يبدو على أنه ساعة فى حياة راكب القطار ، سيحكم عليه الشخص الذى يلاحظه من الخارج على أنه ساعة وربع . فكل منهما يجعل من فترات الزمن التى يلاحظها فى حياة الآخر أطول بربع ساعة من الرجل الذى يحيا هذه الفترات ، والنسبة هى نفسها فيما يتعلق بالأزمان ، كما هى الحال بالنسبة للأطوال .

ولكننا ، حين نقارن حوادث منفصلة انفصالا متباعداً فى المكان ، بدلا من أن نقارن حوادث تقع فى مكان واحد على الأرض ، فإن النتائج ستكون أغرب . فلنأخذ الآن جميع الحوادث التى تقع على الخط الحديدى ، التى تكون من وجهة نظر شخص ثابت على الأرض ، تقع فى لحظة معينة ، ولتكن هذه اللحظة هى اللحظة التى يمر فيها القطار أمام الشخص الثابت . فمن هذه الحوادث ، تكون تلك التى تقع على نقاط يتحرك القطار صوبها — ستبدو للمسافر على أنها قد حدثت فعلا ، بينما الحوادث التى وقعت فى نقاط خلف القطار ، ستبدو بالنسبة له على أنها مازالت فى المستقبل . وحين أقول إن الحوادث فى الاتجاه الأمامى ستبدو على أنها وقعت فعلا ، فإننى أقول شيئاً لايتسم بالدقة التامة ، لأنه لن يكون قد رأى تلك الحوادث بعد ، ولكنه حين يراها فعلا ، فسوف يصل

إلى هذه النتيجة ـــ بعد حساب سرعة الضوء ـــ وهى أنها لا بد أن تكون قد وقعت قبل الحركة المذكورة . والحادثة التى تقع فى الاتجاه الأمامى على الخط الحديدى ، والتى يقرر المشاهد الثابت أنها حدثت الآن (أو الأحرى أن يحكم بأنها وقعت الآن حين يصل إليه نبؤها) إذا وقعت على مسافة من الخط يستطيع الضوء أن يقطعها فى ثانية ، سيحكم عليها المسافر بأنها حدثت منذ ثلاثة أرباع ثانية ، وإذا وقعت على مسافة من المشاهدين يحكم عليها الرجل الواقف على الأرض بأن الضوء يستطيع أن يقطعها فى عام ، فإن المسافر سيحكم (حين يصل نبؤها إليه) بأنها وقعت مبكرة بتسعة أشهر على اللحظة التى مر فيها بساكن الأرض ، وسيؤرخ ـــ بوجه عام ـــ الحوادث التى تقع فى الاتجاه الأمامى على طول الخط الحديدى ـــ قبل حدوثها بثلاثة أرباع الوقت الذى يستغرقه الضوء ليقطع المسافة بينها وبين الرجل الواقف على الأرض والذى يمر به ، والذى يعتقد أن هذه الحوادث تقع الآن ـــ أو سيذهب بالأحرى ـــ إلى أنها قد حدثت الآن عند ما يصل الضوء المنبعث منها إليه . أما الحوادث التى تقع على الخط الحديدى خلف القطار ، فإن تأريخها سيكون بعد زمان حدوثها بنفس المقدار تماماً .

وعلى ذلك ، لا بد لنا من القيام بتصحيح مزدوج فى تاريخ حادثة ما ، حين ننتقل من المشاهد الأرضى إلى المسافر ، فلا بد أولا من أن نأخذ خمسة أرباع الوقت كما يقدره ساكن الأرض ، ثم نطرح من هذا المقدار ثلاثة أرباع الوقت الذى يستغرقه الضوء لينتقل من الحادثة موضوع المسألة إلى المقيم على الأرض .

خذ حادثة وقعت فى جزء بعيد من الكون ، وهذه الحادثة تصبح ظاهرة بالنسبة لساكن الأرض والمسافر فى اللحظة التى يمر فيها أحدهما بالآخر . وهنا يستطيع ساكن الأرض ـــ إذا عرف المكان الذى وقعت فيه الحادثة ـــ أن يحكم منذ متى وقعت تلك الحادثة ، ما دام يعرف سرعة الضوء . وإذا وقعت الحادثة فى الاتجاه الذى يتحرك صوبه المسافر ، فسوف يستنتج المسافر بأنها حدثت منذ ضعف المدة التى يعتقدها ساكن الأرض . أما إذا وقعت فى الاتجاه الذى جاء منه ، فسيجادل بأنها قد حدثت منذ نصف المدة فحسب التى يعتقدها ساكن الأرض . وإذا كان المسافر يتحرك بسرعة مختلفة ، فإن هذه النسب ستكون مختلفة .

فلنفترض الآن — (كما يحدث فى بعض الأحيان) أن نجمين جديدين قد انفجرا فجأة وأصبحا مرئيين للمسافر ولساكن الأرض الذى يمر به . وليكن واحد منهما فى الاتجاه الذى يسافر نحوه القطار ، والآخر فى الاتجاه الذى أتى منه القطار . ولنفترض أن ساكن الأرض يستطيع — بطريقة ما — أن يقدر المسافة بين النجمين ، وأن يستنتج أن الضوء يستغرق خمسين عاماً للوصول إليه من النجم الذى يتحرك صوبه المسافر ، ومائة عام للوصول إليه من النجم الآخر . إنه سيجادل فى هذه الحالة فى أن الانفجار الذى أحدث النجم الجديد فى الاتجاه الأمامى قد حدث منذ خمسين عاما مضت ، بينما الانفجار الذى أحدث النجم الجديد الآخر قد وقع منذ مائة عام خلت . أما المسافر فسيعكس هذه الأرقام تماماً : فسيستنتج أن الانفجار الأمامى قد وقع منذ مائة عام مضت ، والانفجار الخلفى قد وقع منذ خمسين عاما خلت . وأعتقد أن كليهما يجادل جدلا صحيحاً مبنياً على مادة فزيائية صحيحة . والواقع أن كليهما على حق ، اللهم إلا إذا تخيل كل منهما أن الآخر مخطىء . وينبغى أن نذكر أن كلا منهما سيقدر سرعة الضوء تقديراً واحداً ، لأن تقديراتهما لمسافات النجمين الجديدين ستتباين بنفس النسبة التى تتباين بها تقديراتهما للأزمنة منذ حدوث الانفجارين . والواقع أن أحد الدوافع الرئيسية لهذه النظرية بأكملها هو ضمان أن سرعة الضوء واحدة بالنسبة للمشاهدين جميعاً ، أيا كانت حركتهم . وهذه الحقيقة ، التى أقرتها التجربة — لم تكن تتفق مع النظريات القديمة وجعلت من الضرورى — ضرورة مطلقة — قبول شىء يبعث على الدهشة ، ونظرية النسبية تبعث على الدهشة بمقدار تنافرها مع الوقائع . وليس من شك فى أنها لن تكون بعد بعض الوقت باعثة على شىء من الدهشة على الإطلاق .

وهناك سمة أخرى على جانب عظيم من الأهمية فى النظرية التى عرضناها ، وهى أنه على الرغم من أن المسافات والأزمنة تتباين بالنسبة للمشاهدين المختلفين فإننا نستطيع أن نستخلص منهم الكمية المسماة « الفاصل » Interval الذى يعد واحداً بالنسبة للمشاهدين جميعاً . ويتم الحصول على « الفاصل » فى نظرية النسبية الخاصة على الوجه الآتى : خذ مربع المسافة بين حادثتين ، ومربع المسافة التى يقطعها الضوء فى الوقت بين الحادثتين ، اطرح المقدار الأصغر من المقدار الأكبر ، وستكون النتيجة هى مربع الفاصل Interval بين الحادثتين . والفاصل واحد بالنسبة لجميع المشاهدين ، كما أنه يمثل علاقة فزيائية حقيقية بين الحادثين ،

وهذا ما لا يفعله الزمان أو المسافة . ولقد أعطينا تركيباً هندسياً للفاصل فى نهاية الفصل الرابع ، وهذا التركيب يعطى نفس النتيجة التى تعطيها القاعدة المذكورة . والفاصل يكون « زمانياً » حين يكون الزمان بين الحادثتين أطول مما يستغرقه الضوء لينتقل من مكان الواحدة إلى مكان الأخرى ، وفى الحالة المضادة يكون « مكانياً » ، وحين يكون الزمان بين الحادثتين مساوياً تماماً للزمان الذى يستغرقه الضوء فى الانتقال من الواحدة إلى الأخرى ، يكون الفاصل صفراً ، وحينئذ تكون الحادثتان واقعتين على جزءين من شعاع ضوئى واحد ، اللهم إلا إذا لم يحدث أن يمر ضوء ما بهذا الطريق .

وعند ما نصل إلى نظرية النسبية العامة ، لا بد أن نعمم فكرة الفاصل . وكلما نفذنا بعمق إلى تركيب العالم، أصبح هذا التصور أكثر أهمية ، ويغرينا بأن نقول إنها الحقيقة التى ليست المسافات ودورات الزمان سوى تمثيل مشوش لها . ولقد غيرت نظرية النسبية من نظرتنا عن التركيب الأساسى للعالم ، وهذا هو مصدر صعوبتها وأهميتها فى الوقت نفسه .

ويمكن أن يحذف القراء الذين لا يلمون بأية معرفة أولية بالهندسة أو الجبر بقية هذا الفصل. بيد أننى سأضيف بضعة شروح قلائل المعادلة العامة التى لم أعط منها حتى الآن سوى نماذج جزئية ، وذلك لفائدة أولئك الذين لم يهمل تعليمهم إهمالا « تاماً » . والمعادلة العامة التى أشير إليها هى معادلة تحويل لورنتس التى تقول : عند ما يتحرك جسم ما حركة معينة بالنسبة لجسم آخر ، كيف نستنتج مقاييس الأطوال — والأزمان الخاصة بجسم ما من المقاييس الخاصة بالجسم الآخر. وقبل أن أعطى المعادلة الجبرية ، سأعطى تركيباً هندسياً . سنفترض — كما افترضنا من قبل — أن هناك مشاهدين سنسمى أحدهما « و » والآخر « وَ » : أحدهما ثابت على الأرض ، والآخر يسافر بسرعة واحدة على خط حديدى مستقيم . وقد كان المشاهدان — فى مستهل الوقت المذكور — فى نفس النقطة من الخط الحديدى ، ولكنهما الآن منفصلان بمسافة معينة ، وتضرب ومضة من البرق النقطة « س » على الخط الحديدى ، ويحكم « و » أنه فى اللحظة التى وقعت فيها الومضة ، كان المشاهد الموجود فى القطار قد وصل إلى النقطة « وَ » . والمشكلة هى : ما هى المسافة التى سيحكم « وَ » بأنه يبعد بها عن الومضة ؟ وبعد مضى كم من الوقت

بعد بداية الرحلة (عندما كان لا يزال فى نقطة و) سيحكم بأن الومضة وقعت ؟ ومن المفروض أننا نعرف تقديرات « و » ، وأننا نريد أن نحسب تقديرات « وَ »

وفى الزمن الذى انقضى — فى نظر « و » — منذ بداية الرحلة ، فلتكن « و ج » هى المسافة التى يجب على الضوء أن يكون قد قطعها من الخط الحديدى . ارسم دائرة حول « و » بحيث يكون « و ج » هو نصف قطرها . ومن « وَ » ارسم خطاً موازياً للخط الحديدى يلتقى بالدائرة فى د . وعلى الخط « و د » خذ نقطة مثل « ى » بحيث يكون « و ى » مساوياً للخط « و س » (س هى نقطة الخط الحديدى التى يضربها البرق) ارسم الخط ى م موازياً للخط الحديدى ، و « و ط » موازياً للخط « و د » اجعل « ى م » ، « و ط » يلتقيان فى ط ، وكذلك اجعل الخطين « د وَ » ، « و ط » يلتقيان فى ر . ومن « س » و « ج » ارسم خطين موازيين للخط الحديدى يلتقيان بالخط و س فى ك و « ز » على التوالى . وعلى هذا تكون « ر ك » (كما يقيسها و) هى المسافة التى سيعتقد « وَ » أنها تفصل بينه وبين الومضة ، وليس الخط « وَ س » وفقاً للرأى القديم . وبينما يعتقد « و » — أنه فى الوقت المنقضى منذ بداية الرحلة حتى حدوث الومضة أن الضوء سيقطع المسافة « و ج » فإن « وَ » سيعتقد أن الزمن المنقضى هو ما يتطلبه الضوء ليقطع المسافة ط ز (كما يقيسها « و ») ونحصل على « الفاصل » كما يقيسه « وَ » ، بطرح مربع « ر ك » من مربع « س ز » . وقليل من الهندسة الأولية جداً تبين أن هذين متساويان .

والمعادلات الجبرية التى يتضمنها التركيب السابق هى كالآتى : من وجهة نظر « و » ، د ع حادثة تقع على مسافة « س » على طول الخط الحديدى ، وفى زمن « ت » بعد بداية الرحلة (حين يكون وَ فى مكان و) . ومن جهة نظر « و »

دع نفس الحادثة تقع على مسافة ط على الخط الحديدى ، وفى زمن « ت » بعد بداية الرحلة . دع « ج » تكون هى سرعة الضوء و « ف » هى سرعة « وَ » بالنسبة للملاحظ « و » ضع .

$$\text{ب} = \frac{\text{ج}}{\sqrt{\text{ج}^{٢} - \text{ف}^{٢}}}$$

ثم

$$\text{ط} = \text{ب}\,(\text{س} - \text{ف ت})$$

$$\text{تَ} = \text{ب}\,\left(\text{ت} - \frac{\text{ف س}}{\text{ج}^{٤}}\right)$$

هـذه هى معادلات « تحويل لورنتس » ومنها يمكن استنتاج كل ماورد فى هذا الفصل .

الفصل السابع

الفواصل فى متصل "المكان-زمان"

لقد حلت نظرية النسبية الخاصة ، التى عرضناها آنفا — مشكلة معينة محددة حلا تاماً ، ألا وهى : تفسير الواقعة التجريبية التى مؤداها : [حين يكون جسمان فى حركة منتظمة كل بالنسبة للآخر ، فإن قوانين الفزياء جميعاً سواء أكانت قوانين الديناميكا العادية ، أم القوانين المتصلة بالكهرباء والمغناطيسية ، تنطبق هى نفسها تماما على الجسمين] . والحركة « المنتظمة » هنا معناها الحركة فى خط مستقيم وبسرعة ثابتة . ولكن ، على الرغم من أن النظرية الخاصة قد حلت مشكلة ، فقد أثيرت على الفور مشكلة أخرى . ماذا لو أن حركة الجسمين لم تكن منتظمة ؟ فلنفرض — على سبيل المثال أن أحد الجسمين هو الأرض ، بينما الجسم الآخر عبارة عن حجر ساقط ، فللحجر سرعة متزايدة وهو يسقط باستمرار أسرع فأسرع . وهنا لا نجد شيئاً فى النظرية الخاصة يمكننا من أن نقول إن قوانين الظاهرة الفزيائية ، ستكون هى نفسها بالنسبة لمشاهد على الحجر ، ومشاهد على الأرض وهذا شىء محير بوجه خاص ، لأن الأرض نفسها — بمعنى واسع — عبارة عن جسم ساقط ، ولها فى كل لحظة سرعة[1] نحو الشمس ، وهى السرعة التى تجعلها تدور حول الشمس بدلا من أن تتحرك فى خط مستقيم . ولما كانت معرفتنا بالفزياء مستمدة من تجاربنا على الأرض ، فنحن لا نستطيع أن نقنع بنظرية يفترض فيها أن المشاهد بلا سرعة . ونظرية النسبية العامة تزيل هذا القيد ، وتسمح للمشاهد أن يتحرك بأية طريقة : فى خط مستقيم أو ملتو ، بطريقة منتظمة ، أو يتحرك بعجلة . وفى أثناء إزالة هذا القيد ، انتهى أينشتين إلى قانونه الجديد فى الجاذبية ، وهو القانون الذى سنتناوله الآن . وكان العمل صعباً صعوبة

---

(١) هذا لا يعنى أن سرعتها متزايدة ولكن معناه أنها متغيرة الاتجاه والنوع الوحيد للحركة الذى لا عجلة له هو الحركة ذات السرعة المنتظمة « فى خط مستقيم » .

غير عادية . وشغله عشر سنوات . فلقد ظهرت النظرية الخاصة عام ١٩٠٥ ، والنظرية العامة سنة ١٩١٥ .

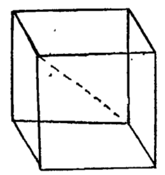
ومن الجلي — من الخبرات المألوفة لنا جميعاً — أن الحركة المتغيرة السرعة أصعب كثيراً فى تناولها من الحركة المنتظمة . فإذا كنت فى قطار يجرى بسرعة منتظمة ، فلن تلحظ حركته ما دمت لا تنظر من النافذة ؛ ولكن ، حين تستخدم الفرامل فجأة ، تندفع إلى الأمام ، وتدرك أن شيئاً ما يحدث دون أن يكون عليك أن تشاهد أى شىء خارج القطار . وكذلك يبدو كل شىء عادياً فى المصعد حينما يتحرك بانتظام ، ولكنه فى البدء والوقوف حين تتغير سرعته ، فإنك تشعر بإحساسات غريبة فى الأبطء . (تسمى حركة ما متغيرة حين تزداد بطئا ، أو تزداد سرعة ، وحين تبطىء يكون التغيير سلبياً) وهذا الكلام نفسه ينطبق على إسقاط ثقل فى قمرة سفينة . فما دامت السفينة تتحرك حركة منتظمة ، فان الثقل سوف يسلك بالنسبة للقمرة — وكأن السفينة ساكنة لا تتحرك ، فإذا بدأ فى السقوط من منتصف السقف فإنه سيقع فى منتصف الأرضية . ولكن إذا كان ثمة تغيير فى السرعة فسوف يتغير كل شىء . فإذا كانت السفينة تزيد من سرعتها زيادة كبيرة ، فسيبدو الثقل بالنسبة لمشاهد موجود داخل القمرة — ساقطاً فى منحنى متجها نحو المؤخرة ، وإذا كانت الحركة تتناقص بسرعة ، فسوف يكون المنحنى متجها نحو المقدمة . هذه الحقائق جميعاً مألوفة ، وقد أدت بجاليليو ونيوتن إلى إلى أن ينظرا إلى الحركة المتغيرة على أنها شىء مختلف اختلافاً أساسيا بطبيعته عن الحركة المنتظمة . بيد أن هذه التفرقة لا يمكن الاقتناع بها إلا بالنظر إلى الحركة بوصفها مطلقة ، لا نسبية . فلو أن كل حركة كانت نسبية ، فإن الأرض تغير سرعتها بالنسبة للمصعد ، كما يغير المصعد سرعته بالنسبة للأرض تماماً ومع ذلك فإن الأشخاص الواقفين على الأرض لا يشعرون بإحساسات غريبة فى الأبط حين يبدأ المصعد فى الارتفاع . وهذا يصور لنا صعوبة مشكلتنا والواقع أنه على الرغم من اعتقاد عدد قليل من الفزيائيين فى عصرنا الحديث فى الحركة المطلقة ، فمازالت تقنية (تكنيك) الفزياء الرياضية تتضمن اعتقاد نيوتن فى هذه الحركة المطلقة ، وكان لابد من ثورة فى المنهج لكى نحصل على تقنية (تكنيك) متحررة من هذا الافتراض . وقد تمت هذه الثورة فى نظرية أينشتين النسبية العامة

وربما كانت بدايتنا فى شرح الأفكار الجديدة التى أتى بها أينشتين (انتقائية) إلى حد ما ، ولكننا نحسن صنعاً لو أخذنا بتصور « الفاصل » . فهذا التصور — كما يبدو فى نظرية النسبية الخاصة — تعميم فعلا للفكرة التقليدية عن المسافة فى المكان والزمان ، ولكن من الضرورى تعميمها أكثر من ذلك . وأيا كان الأمر ، فمن الضرورى أن نشرح أولا قدراً معيناً من التاريخ ؛ ولهذا الغرض ينبغى أن نرجع القهقرى إلى فيثاغورس .

ولعل فيثاغورس — شأنه فى ذلك شأن كثير من الشخصيات العظيمة فى التاريخ — لم يوجد قط ، فهو شخصية شبه أسطورية جمعت بين الرياضة والكهانة بنسب غير يقينية . وسأفترض — على كل حال — أنه قد وجد ، وأنه اكتشف النظرية المنسوبة إليه . وقد كان فيثاغورس معاصراً — على وجه التقريب — لكونفوشيوس وبوذا ، وأنشأ طائفة دينية كان تعتقد أن من الشر أكل الفول ، كما أنشأ مدرسة للرياضيين اهتمت اهتماماً خاصاً بالمثلثات قائمة الزوايا . وتقول نظرية فيثاغورس (وهى النظرية ٤٧ عند إقليدس) إن مجموع المربعين المنشأين على الضلعين القصيرين من المثلث القائم الزاوية يساوى المربع المنشأ على الضلع المقابل للزاوية القائمة . وليس فى الرياضة كلها عبارة لها ما لهذه العبارة من التاريخ المتميز . وقد تعلمنا جميعاً كيف نبرهن عليها فى صبانا . ومن الحق أن « البرهان » لم يكن يثبت شيئاً ، والطريقة الوحيدة لإثباتها كانت بواسطة التجربة . والحقيقة أيضاً أن هذه القضية ليست صادقة تماما ، ولكنها صادقة على وجه التقريب . بيد أن كل شىء فى الهندسة — وبالتالى فى الفزياء — مشتق منها بتعميمات متعاقبة ، وأحدث هذه التعميمات هى نظرية النسبية العامة .

ومن المرجح أن نظرية فيثاغورس نفسها، عبارة عن تعميم لقاعدة «الإبهام» المصرية . فقد كان من المعروف منذ قرون فى مصر أن المثلث الذى تكون أضلاعه ٣ ، ٤ ، ٥ وحدات فى الطول يكون مثلثا قائم الزاوية. وقد استخدم المصريون هذه المعرفة — من الوجهة العملية . فى قياس حقولهم . والآن ، إذا كانت أضلاع المثلث هى ٣ ، ٤ ، ٥ بوصة فإن المربعات المنشأة على هذه الأضلاع ستكون مساحتها على التوالى هى ٩ ، ١٦ ، ٢٥ بوصة مربعة ، وإذا أضيفت ٩ إلى ١٦ فسيكون

الناتج ٢٥ . وثلاثة أضعاف ثلاثة تكتب « ٣^٢ » وأربعة أضعاف أربعة تكتب « ٤^٢ » وخمسة أضعاف خمسة تكتب « ٥^٢ » وبذلك تكون لدينا هذه المعادلة :



$$٣^٢ + ٤^٢ = ٥^٢$$

ومن المفروض أن فيثاغورس قد تنبه لهذه الحقيقة ، بعد أن تعلم من المصريين أن المثلث الذى أضلاعه هى ٣ ، ٤ ، ٥ مثلث قائم الزاوية ، ووجد أن هذه الحقيقة يمكن تعميمها ، ومن ثم فقد توصل إلى نظريته المشهورة : فى المثلث القائم الزاوية ، يكون المربع المنشأ على الضلع المقابل للزاوية القائمة — مساويا لمجموع المربعين المنشأين على الضلعين الآخرين .

وكذلك الحال فى الأشكال ذات الأبعاد الثلاثة : إذا أخذت كتلة قائمة الزوايا فإن المربع المنشأ على القطر (وهو الخط المرسوم بالنقط فى الشكل المقابل) يساوى مجموع المربعات المنشأة على الجوانب الثلاثه .

هذا أقصى ما وصل إليه الأقدمون فى هذه المسألة .

وترجع الخطوة الهامة التالية إلى ديكارت الذى جعل من نظرية فيثاغوس أساس منهجه فى الهندسة التحليلية . فلنفترض أنك تريد أن ترسم خريطة منظمة لجميع الأماكن الموجودة فى سهل ما — وسنفترض أن هذا السهل صغير بدرجة تجعل من الممكن تجاهل حقيقة أن الأرض كروية. وسنفترض أنك تعيش وسط هذا السهل ، ومن أبسط الطرق لوصف موقع مكان أن تقول : ابدأ من منزلى ، ثم سر مسافة كذا وكذا ناحية الشرق ، ثم مسافة كذا وكذا شمالا (وقد يكون الغرب فى الحالة الأولى ، والجنوب فى الحالة الثانية) . وهذا يخبرك بموقع المكان تماما ، وهذا هو المنهج الطبيعى المتبع فى مدن أمريكا المستطيلة الشكل ففى نيويورك سيقال لك ، سر عددا معينا من العمارات شرقا (أو غربا) ثم عددا معينا من العمارات شمالا (أو جنوبا) . والمسافة التى عليك أن تقطعها شرقا سنسميها (س) والمسافة التى عليك أن تقطعها شمالا سنسميها (ى) ... وإذا كان عليك أن تتجه غربا ، فستكون س سالبة ، وإذا كان عليك أن تتجه جنوبا فإن ى ستكون سالبة) .

فلتكن «و م» هى المسافة التى تقطعها شرقاً ، و«م ب» هى المسافة التى تقطعها شمالا . فعلى أى بعد تكون من منزلك على خط مستقيم عندما تصل إلى ب ؟ إن نظرية فيثاغورس تعطيك الإجابة .

فالمربع القائم على و ب هو مجموع المربعين المقامين على «وم» و «م ب» فإذا كان «و م» عبارة عن أربعة أميال ، و «م ب» ثلاثة أميال، فإن «و ب» يكون خمسة أميال . وإذا كان «وم» ١٢ ميلا و «م ب» خمسة أميال، فسيكون «و ب» ثلاثة عشر ميلا لأن $١٢^٢ + ٥^٢ = ١٣^٢$. وهكذا إذا اصطنعت منهج ديكارت فى رسم الخرائط، فإن نظرية فيثاغورس تكون جوهرية فى إعطائك المسافة من مكان إلى مكان . وفى الأشكال ذات الأبعاد الثلاثة الأمر مماثل تماماً . فلنفترض أنك تريد بدلا من مجرد تحديد المواقع على السهل ، أن تثبت محطات لاعتقال البالونات فوقه ، فعليك فى هذه الحالة أن تضيف مقداراً ثالثاً ، هو الارتفاع الذى سيكون عليه البالون . فإذا رمزت إلى الارتفاع بحرف «ع» ، وكانت «ر» هى المسافة المباشرة من «و» إلى البالون ، فستكون لديك هذه المعادلة :

$$ر^٢ = س^٢ + ص^٢ + ع^٢ ،$$

ومن هذه المعادلة يمكن أن تحسب «ر» حين تعرف «س» ، «ص» ، «ع» . فإذا كنت تستطيع مثلا أن تصعد إلى البالون بأن تسير ١٢ ميلا إلى الشرق ، وأربعة أميال إلى الشمال ، وثلاثة أميال إلى أعلى فإن بعدك عن البالون فى خط مستقيم هو ثلاثة عشر ميلا لأن $١٢ \times ١٢ = ١٤٤$ ، $٤ \times ٤ = ١٦$ ، $٣ \times ٣ = ٩$ ،
$١٤٤ + ١٦ + ٩ = ١٦٩ = ١٣ \times ١٣$

ولكن فلنفترض أنك بدلا من أن تأخذ رقعة صغيرة من سطح الأرض التى يمكن اعتبارها مسطحة ، فإنك تريد أن ترسم خريطة للعالم . ورسم خريطة دقيقة للعالم على ورقة مسطحة أمر محال . ويمكن أن تكون الكرة دقيقة بمعنى أن كل شىء

مرسوم عليها بمقياس رسم معين، أما الخريطة المسطحة فلا يمكن أن تكون دقيقة. ولست أتحدث عن صعوبات عملية ، بل أتحدث عن استحالة نظرية . وعلى سبيل المثال : الأنصاف الشمالية من خط زوال جرينتش ، وخط عرض ٩٠ فى الطول الغربى ، مع الجزء الموجود من خط الاستواء بينهما ، تؤلف مثلثاً متساوى الأضلاع وزواياه جميعاً قائمة . مثل هذا النوع من المثلثات مستحيل على سطح مستو . ومن الممكن — من ناحية أخرى — أن تنشىء مربعاً على سطح مستو، ولكنك لن تستطيع ذلك على جسم كروى . فلنفترض أنك تحاول ذلك على الأرض. سر مائة ميل غرباً ، ثم مائة ميل شمالا ، ثم مائة ميل شرقاً ، ثم مائة ميل جنوباً. ولعلك تعتقد بهذا أنك رسمت مربعاً ، والحقيقة أنك لن ترسم مربعاً ، لأنك لن تعود فى النهاية إلى النقطة التى بدأت منها . وإذا أتيح لك الوقت ، فربما استطعت أن تقنع نفسك بالتجربة ، وإذا لم يتح لك الوقت، فإنك تستطيع أن ترى بسهولة أن هذا الأمر ينبغى أن يكون كذلك . وحين تكون أقرب إلى القطب ، فإن مائة ميل تقطع بك مسافة أطول على خط الطول — مما لو كنت أقرب إلى خط الاستواء ، بحيث إنك حين تسير مائة ميل شرقاً (إذا كنت فى نصف الكرة الشمالى) فإنك تصل إلى نقطة أبعد إلى الشرق من النقطة التى بدأت منها . فإذا اتجهت جنوباً بعد ذلك ، فإنك تظل أبعد فى الشرق من نقطة بدايتك ، كما تنتهى عند مكان مختلف عن المكان الذى بدأت منه . فلنفترض — على سبيل مثال آخر — أنك بدأت على خط الاستواء من نقطة تبعد أربعة آلاف ميل شرق خط زوال جرينتش ، ثم سافرت شمالا على هذا الخط أربعة آلاف ميل ، مخترقاً جرينتش ، ومصعداً إلى المنطقة المجاورة لجزر شتلاند ، ثم سافرت بعد ذلك شرقا مسافة أربعة آلاف ميل ، ثم أربعة آلاف ميل جنوباً . . سيأخذك هذا كله إلى خط الاستواء عند نقطة تبعد حوالى أربعة آلاف ميل شرقاً عن النقطة التى بدأت منها .

وهذا الذى قلناه حتى الآن ، ليس صائباً تماماً — بمعنى ما ، وذلك لأن السفر شرقاً ليس هو أقصر طريق من مكان إلى مكان آخر يبعد عن المكان الأول شرقاً ، اللهم إلا عند خط الاستواء . فالسفينة التى تبعد عنا إلى الشرق — ستبدأ بالذهاب إلى مسافة معينة ناحية الشمال — وستبحر فى « دائرة عظمى » أى

دائرة مركزها هو مركز الأرض . وهذا هو أقرب اقتراب للخط المستقيم الذى يمكن رسمه على سطح الأرض . ودوائر خطوط الزوال الطولية عبارة عن دوائر عظمى ، وكذلك خط الاستواء ، أما خطوط العرض المتوازية الأخرى فليست كذلك . ولهذا ينبغى علينا إذن أن نكون قد افترضنا أنك حين تصل إلى جزر شتلاند ، تسافر أربعة آلاف ميل — لامتجهاً إلى الشرق ، بل فى دائرة كبيرة تنتهى بك عند نقطة شرق جزر شستلاند . وهذا ، على كل حال ، يدعم نتيجتنا : وهى أنك تنتهى عند نقطة أبعد شرقاً مما كانت عليه نقطة بدايتك من قبل .

ماهى الفروق بين الهندسة على سطح كروى والهندسة علىسطح مستو ؟ إنك إذا رسمت مثلثاً على الأرض ، أضلاعه عبارة عن دوائر عظمى فلن تجد أنمجموع زوايا المثلث عبارة عن زاويتين قائمتين : إن مجموعهما سيكون أكبر . والمقدار الذى تتجاوز به الزاويتين القائمتين يتناسب مع حجم المثلث . وعلى مثلث صغير يمكن أن ترسمه بالخيط على حديقتك أو حتى على مثلث تكونه ثلاث سفن تستطيع كل منها أن ترى الأخرى ؛ فإن الزوايا لن تزيد إلا قليلا جداً عن زاويتين قائمتين ، بحيث لن تستطيع أن تعثر على الفرق . ولكنك إذا أخذت المثلث الذى يصنعه خط الاستواء وخط زوال جرينتش وخط الزوال ٩٠ فإن مجموع الزوايا يصل إلى « ثلاث » زوايا قائمة . وتستطيع أيضاً أن تحصل على مثلثات يصل مجموع زواياها إلى ستة زوايا قائمة . وهذا كله تستطيع أن تكتشفه بقياسات على سطح الأرض ، دون أن يكون عليك أن تحسب حساباً لأى شىء آخر فى بقية المكان .

وتفشل نظرية فيثاغورس أيضاً بالنسبة للمسافات الموجودة على سطح كروى . فإن المسافة بين مكانين من وجهة نظر مسافر مقيد إلى الأرض — هى مسافة « دائرتها العظمى » أى أقصر رحلة يستطيع أن يقوم بها إنسان دون أن يغادر سطح الأرض. فلنفترض الآن أنك أخذت ثلاثة أجزاء صغيرة من دوائر عظمى تصنع مثلثاً ، ولنفترض أن كل واحدة منها متعامدة على الأخرى ، أو لكى نكون محددين ، فلتكن واحدة على خط الاستواء والأخرى هى خط زوال جرينتش

والثالثة متجهة شمال خط الاستواء . فلنفترض أنك سرت ثلاثة آلاف ميل على خط الاستواء ، ثم أربعة آلاف ميل شمالا ، أين ستكون من نقطة بدايتك ، مع تقدير لمسافة على دائرة عظمى ؟ إنك إذا كنت على سطح مستو ، فستكون على بعد خمسة آلاف ميل ، كما رأينا من قبل . والواقع — على كل حال — أن مسافة الدائرة العظمى ستكون أقل كثيراً من ذلك . فني المثلث القائم الزاوية المرسوم على سطح كروى ، يكون المربع المنشأ على الضلع المقابل للزاوية القائمة أقل من مجموع المربعين المنشأين على الضلعين الآخرين . هذه الفروق بين الهندسة على سطح كروى وبين الهندسة على سطح مستو ، فروق أصلية أى أنها تمكنك من أن تجد ما إذا كان السطح الذى تعيش عليه يشبه سطحاً مستوياً أم كروياً دون أن يتطلب ذلك أن تدخل فى حسابك أى شيء آخر خارج هذا السطح . وقد أدت مثل هذه الاعتبارات إلى الخطوة الثالثة الهامة فى موضوعنا ، وهى الخطوة التى قام بها جاوس Gauss الذى عاش منذ مائة وخمسين عاماً مضت. وقد درس «جاوس» نظرية «السطوح» وتبين كيف يمكن تطويرها (أو التوسع فيها) بوساطة القياسات على السطوح نفسها دون الخروج عنها فلكى نحدد موقع نقطة فى المكان ، نحتاج إلى ثلاث قياسات . ولكننا لكى نحدد موقع نقطة على سطح نحتاج إلى قياسين فقط : فمثلا يتم تحديد نقطة على سطح الأرض إذا عرفنا خط العرض وخط الطول اللذين يمران بها .

وهنا وجد «جاوس» أنه أياً كان نظام القياس الذى تتخذه ، وأياً كانت طبيعة السطح ، فهناك دائماً طريقة لحساب المسافة بين نقطتين غير متباعدتين جداً على السطح . حين تعرف المقادير التى تحدد مواقعهما ، والمعادلة الخاصة بالمسافة هى تعميم لمعادلة فيثاغورس ، فهى تنبئك بمربع المسافة بدلالة مربعات الاختلاف بين المقادير المقيسة التى تحدد النقطتين ، وكذا حصيلة هذين المقدارين . وحين تعرف هذه المعادلة تستطيع أن تكشف الصفات الأصلية جميعاً للسطح ، أى ، كل تلك الصفات التى لا تعتمد على علاقات بنقاط خارج السطح . فتستطيع أن تكتشف مثلا ، ما إذا كانت زوايا مثلث ما ، يصل مجموعها إلى زاويتين قائمتين أو أكثر ، أو أقل ، أو أكثر فى بعض الحالات ، وأقل فى بعضها الآخر .

ولكننا حين نتحدث عن « مثلث » فلابد أن نشرح ما نعنيه ، لأنه لا توجد خطوط مستقيمة على معظم السطوح. فعلى سطح كروى سنستبدل الخطوط المستقيمة بدوائر عظمى التى هى أقرب تقارب ممكن للخط المستقيم . وسنأخذ — بوجه عام — بدلا من الخطوط المستقيمة — الخطوط التى تعطينا أقصر طريق على السطح من مكان إلى مكان. مثل هذه الخطوط تسمى خطوط جيوديسية Geodesics وهذه الخطوط الجيوديسية على الأرض عبارة عن دوائر عظمى ، فهى على وجه العموم أقصر طريق للسفر من نقطة إلى نقطة ، إذا لم تكن قادراً على مغادرة السطح . وهى تأخذ مكان الخطوط المستقيمة فى الهندسة الداخلية لسطح ما . وحين نتساءل عما إذا كانت زوايا مثلث يصل مجموعها إلى زاويتين قائمتين أو لا يصل ، فإننا نعنى الحديث عن مثلث أضلاعه خطوط جيوديسية ، وعندما نتحدث عن مسافة بين نقطتين ، فإننا نعنى المسافة على خط جيوديسى .

والخطوة التالية فى عملية التعميم التى نقوم بها ، صعبة إلى حد ما : إنها الانتقال إلى الهندسة اللا إقليدية . فنحن نعيش فى عالم ، المكان فيه ثلاثة أبعاد ، ومعرفتنا التجريبية بالمكان مؤسسة على قياس المسافات الصغيرة والزوايا (وحين أتحدث عن المسافات الصغيرة أعنى المسافات الصغيرة بالقياس إلى مسافات الفلك ، وكل المسافات التى على الأرض صغيرة بهذا المعنى .) وقد كان من المعتقد سابقاً أننا نستطيع التأكد قبليا من أن المكان إقليدى — فمثلا ، مجموع زوايا المثلث يساوى مجموع زاويتين قائمتين . ولكن ، عرفنا فيما بعد أننا لا نستطيع إثبات ذلك بالمنطق ، وإذا كان لابد من معرفة ذلك ، فينبغى أن يعرف كنتيجة للقياسات. وكان من المعتقد قبل أينشتين أن القياسات تؤكد الهندسة الإقليدية داخل حدود الدقة الممكنة . والآن ، لم يعد ذلك معتقداً ، ومابرح صادقاً أننا نستطيع — بما يمكن أن يسمى حيلة طبيعية — أن نجعل الهندسة الإقليدية « تبدو » صادقة خلال منطقة صغيرة مثل الأرض ، ولكن ، أدى الأمر بأينشتين فى شرحه للجاذبية إلى رأيه القائل بأنه فى المناطق الكبيرة حيث توجد مادة ، لا يمكن أن ننظر إلى المكان بوصفه إقليدياً . وسنهتم بأسباب ذلك فيما بعد . أما ما يهمنا الآن ، فهى الطريقة التى تنتج بها الهندسة اللا إقليدية من تعميم العمل الذى قام به « جاوس » .

ليس هناك سبب يجعلنا لانجد نفس الظروف فى المكان ذى الأبعاد الثلاثة ، كما نجده مثلا — على سطح كرة . وقد يحدث أن زوايا المثلث مجموعها دائماً أكثر من زاويتين قائمتين وأن الزيادة تكون متناسبة مع حجم المثلث . وقد يحدث أن المسافة بين نقطتين تعطى معادلة مماثلة المعادلة التى لدينا على سطح كرة ، ولكنها تتطلب ثلاثة مقادير ، بدلا من مقدارين . وسواء يحدث هذا أم لايحدث ، لايمكن اكتشافه إلا بالقياسات الفعلية فحسب ، فهناك عدد لامتناه من مثل هذه الإمكانيات .

وتطورت هذه الطريقة على يد « ريمان » Riemann فى رسالته « عن الافتراضات الكامنة وراء الهندسة » (١٨٥٤) والتى طبق فيها عمل جاوس عن السطوح على أنواع مختلفة من الأماكن ذات الأبعاد الثلاثة . وبين أن جميع السمات الجوهرية لنوع معين من المكان يمكن استنباطها من المعادلة الخاصة بالمسافات الصغيرة . وافترض أنه ، من المسافات الصغيرة فى ثلاثة اتجاهات معطاة يمكن أن تحملك معها من نقطة إلى أخرى ليست بعيدة عنها ، فمن الممكن حساب المسافة بين النقطتين . فإذا عرفت — مثلا — أنك تستطيع الانتقال من نقطة إلى أخرى بأن تتحرك مسافة معينة ناحية الشرق ، ثم مسافة معينة ناحية الشمال ، وأخيراً مسافة معينة مستقيمة إلى أعلى فى الهواء فإنك تكون قادراً على حساب المسافة من نقطة إلى أخرى . وقاعدة الحساب هى امتداد لنظرية فيثاغورس ، بهذا المعنى، وهو أنك تتوصل إلى مربع المسافة المطلوبة بجمع مضاعفات مربعات المسافات المكونة ، مع مضاعفات حصيلتها . ومن بعض السمات المعينة فى المعادلة ، يمكنك أن تستدل على نوع المكان الذى تتناوله هذه المسألة . وهذه السمات لاتعتمد على المنهج الخاص الذى اتبعته فى تحديد مواقع النقط .

ولكى نصل إلى مانريده من نظرية النسبية ، علينا الآن أن نقوم بتعميم آخر: علينا أن نستبدل المسافة بين نقطتين « بالفاصل » بين الحادثتين . وهذا يفضى بنا إلى متصل «المكان — الزمان» . ولقد رأينا أننا نجد مربع « الفاصل» — فى نظرية النسبية الخاصة — بطرح مربع المسافة بين حادثتين من مربع المسافة التى يقطعها الضوء فى الوقت المنقضى بينهما . أما فى النظرية العامة ، فلا نفترض هذه الصورة الخاصة للفاصل، بل نفترض أننا نبدأ بصورة عامة شبيهة بالصورة التى استخدمها

ريمان للسافات . وفضلا عن ذلك ، فقد افترض أينشتين — شأنه فى ذلك شأن ريمان — معادلته للحوادث « المتجاورة » فحسب ، أى للحوادث ذات الفاصل القصير بينها فحسب . أما مايجرى وراء هذه الافتراضات الأولى فيتوقف على ملاحظة الحركة الفعلية للأجسام ، بطرق سنقوم بشرحها فى الفصول القادمة.

ونستطيع الآن أن نلخص و نعيد تقرير العملية التى قمنا بوصفها . فى الأماكن ذات الأبعاد الثلاثة يمكن تحديد موقع نقطة بالنسبة لنقطة ثابتة (الأصل) بالإشارة إلى ثلاثة مقادير (الإحداثيات) . فمن الممكن مثلا تحديد موقع بالون بالنسبة لمنزلك ، إذا عرفت أنك تصل إليه بأن تسير أولا مسافة معينة صوب الشرق ، ثم مسافة أخرى معينة ناحية الشمال ، ثم بالصعود مسافة أخرى إلى أعلى . وعندما تكون الإحداثيات الثلاث — كما هى الحال فى هذا المثل — ثلاث مسافات متعامدة بعضها على البعض الآخر ، والتى تنقلك على التوالى إلى أصل النقطة موضوع المسألة، فإن مربع المسافة المباشرة لهذه النقطة ، هو مجموع مربعات الإحداثيات الثلاث . وفى الحالات جميعاً — سواء فى المكان الإقليدى أو فى المكان اللا إقليدى ، يمكن الحصول عليه بجمع مضاعفات المربعات ونواتج الاحداثيات وفقاً للقاعدة المقررة . وقد تكون الإحداثيات أية مقادير تحدد موقع نقطة ما ، بشرط أن تكون للنقاط المتجاورة مقادير متجاورة لإحداثياتها . ونحن نضيف — فى النظرية العامة للنسبية — إحداثية رابعة لنعطى الزمان ، ومعادلتنا تعطى « الفاصل » بدلا من المسافة المكانية ، وفضلا عن ذلك فإننا نفترض دقة معادلتنا بالنسبة للسافات الصغيرة فحسب .

وها نحن أخيراً فى وضع يسمح لنا بتناول نظرية أينشتين فى الجاذبية .

الفصل الثامن

قانون أينشتين للجاذبية

قبل أن نتعرض لقانون أينشتين الجديد ، يحسن بنا أن نقنع انفسنا — على أسس منطقية — بأن قانون نيوتن للجاذبية لا يمكن أن يكون صحيحا تمام الصحة .

قال نيوتن إنه بين أي جسيمين من المادة ، ثمة قوة تتناسب مع حاصل ضرب كتلتيهما ، وتتناسب عكسياً مع مربع المسافة بينهما . وهذا معناه — بغض النظر فى الوقت الحالى عن مسألة الكتلة — أنه إذا كان هناك جذب معين حين يكون الجسمان على بعد ميل ، كل عن الآخر ، فسيكون بينهما ربع قوة الجذب إذا كانت المسافة بينهما ميلين ، وتسع قوة الجذب حين تكون المسافة بينهما ثلاثة أميال ، وهلم جرا : فالجذب يتناقص بأسرع مما تزداد المسافة . والآن ، عندما تحدث نيوتن عن المسافة ، فقد كان يعنى — بالطبع — المسافة فى وقت معين . بيد أننا قد رأينا أن هذا خطأ . فما يحكم عليه ملاحظ بأنه نفس اللحظة على الأرض والشمس ، يحكم عليه ملاحظ آخر بأنهما لحظتان مختلفتان . « فالمسافة فى لحظة معينة » عبارة إذن عن تصور ذاتى : من العسير أن يدخل فى قانون كونى . ونستطيع بالطبع — أن نجعل قانوننا غير ملتبس بأن نقول إننا سوف نقدر الأزمنة كما يقدرها مرصد جرينتش ، غير أننا لانكاد نعتقد أن ظروف الأرض العرضية تستحق أن تؤخذ هذا المأخذ من الجد . وسيختلف تقدير المسافة أيضاً بالنسبة للشاهدين المختلفين. وعلى هذا لانستطيع أن نسمح بأن تكون الصورة التى عليها قانون نيوتن للجاذبية صحيحة تماماً ، مادامت ستعطى نتائج مختلفة وفقاً لعدد المواصفات المشروعة التى تتبناها على حد سواء . وهذا القول لايقل عبثاً عن مسألة يكون فيها تحديد رجل قتل رجلا آخر متوقفاً على وصف كل منهما باسمه الخاص أو باسم عائلته . ومن

الجلى أن القوانين الفزيائية ينبغى أن تكون واحدة سواء قيست المسافات بالأميال أم بالكيلومترات . ونحن مهتمون بما يمكن أن يعد — جوهرياً — امتدادا لنفس المبدأ .

وقياساتنا أكثر خضوعا للاتفاق ، مما تقبله نظرية النسبية الخاصة . وفضلا عن ذلك فإن كل قياس عبارة عن عملية فزيائية تتم بوساطة مادة فزيائية ، والنتيجة هى بكل تأكيد ، معطى تجريبى experimental datum ولكنها قد لا تكون قابلة للتفسير البسيط الذى نخلعه عليها عادة . ولهذا ، لن نفترض — كبداية — أننا نعرف كيف نقيس أى شىء ، وسنفترض أن هناك كمية فزيائية معينة تسمى « الفاصل » وهو عبارة عن علاقة بين حادثتين لا تنفصل إحداهما عن الأخرى انفصالا متباعداً جداً ، ولكنا لانفترض مقدماً أننا نعرف كيف نقيسها ، دون أن نتجاوز ما أخذناه على أنه شىء مفروغ منه ، وهو أنها تعطى بوساطة تعميم معين لنظرية فيثاغورس ، كما تحدثنا عن ذلك فى الفصل السابق .

ومهما يكن من أمر ، فنحن نفترض أن للحوادث « نظاماً » ، وأن هذا النظام ذو أبعاد أربعة . ونحن نفترض — أعنى أننا نعرف ما نعنيه بقولنا إن حادثة معينة أقرب إلى حادثة أخرى من حادثة ثالثة ، بحيث أننا قبل أن نقوم بقياسات دقيقة ، نستطيع أن نتحدث عن « جوار » حادثة ما ، ونحن نفترض — أنه لكى نحدد موقع حادثة فى متصل « الزمان — مكان » فلابد لنا من أربعة مقادير (إحداثيات) وهذه المقادير الأربعة هى فى الحالة السابقة الخاصة بالانفجار الذى حدث فى منطاد : خط العرض وخط الطول ، والارتفاع والزمان . ولكننا لانفترض شيئاً عن الطريقة التى تحدد بوساطتها هذه الإحداثيات ، اللهم إلا أن الإحداثيات المتجاورة تنسب لحوادث متجاورة .

والطريقة التى تتم بها تحديد هذه الأرقام المسماة إحداثيات ليست جزافية تماماً ، كما أنها ليست نتيجة لقياس دقيق ، بل هى تقع فى منطقة وسط بين هذا وذاك . فبينما تقوم برحلة متصلة ، ينبغى ألا تتغير إحداثياتك فى قفزات مفاجئة . ففى أمريكا — من المرجح أن تحمل المنازل بين الشارع الرابع عشر والشارع الخامس عشر الأرقام من ١٤٠٠ إلى ١٥٠٠ ، بينما من المرجح أن تحمل المنازل

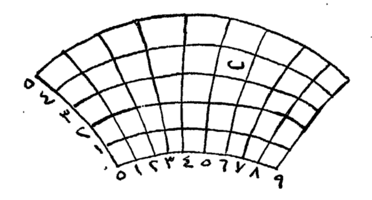
الموجودة بين الشارع الخامس عشر والشارع السادس أرقاماً بين ١٥٠٠ و ١٦٠٠، حتى ولو لم تكن الأرقام المبتدئة بـ ١٤٠٠ قد استنفذت . ولن يفيد ذلك أغراضنا، لأن هناك قفزة مفاجئة حين ننتقل من عمارة إلى أخرى . أو لعلنا نحدد إحداثية الزمن بالطريقة التالية : خذ الزمن الذى ينقضى بين مولدين متعاقبين لشخصين يدعيان « سميث » وحينئذ تكون للحادثة التى تقع بين مولدى سميث رقم ٣٠٠٠ ، وسميث الواحد بعد الثلاثة آلاف إحداثية تقع بين ٣٠٠٠ و ٣٠٠١ ، والجزء الكسرى لإحداثيتها سيكون كسراً من السنة التى انقضت منذ ميلاد سميث الثلاثة آلاف . (من الواضح أنه لن يكون قط ما يعادل عاماً بين إضافتين متعاقبتين للعائلة المؤلفة من أسماء سميث) وهذه الطريقة لتحديد إحداثية الزمان محددة تماماً ، ولكنها غير مقبولة بالنسبة لأغراضنا ، إذ سيكون هناك قفزات مفاجئة بين الحوادث التى تقع قبل مولد سميث مباشرة ، وبعد مولده مباشرة بحيث لا تتغير إحداثية زمنك ، فى رحلتك المتصلة تغيراً مستمراً . ومن المفترض — بغض النظر عن القياس — أننا نعرف ما تعنيه الرحلة المتصلة . وحين يتغير وضعك فى متصل « الزمان — مكان » باستمرار ، فإن كل إحداثية من إحداثياتك الأربع ينبغى أن تتغير باستمرار ، ولكن ، مهما يحدث من تغيير ، فلابد أن يكون تغييراً هادئاً ، بلا قفزات مفاجئة . وهذا يفسر لنا « ما ليس » مسموحاً به فى تحديد الإحداثيات .

ولنفترض — لشرح كل التغيرات المشروعة فى إحداثياتك — أنك أخذت قطعة كبيرة من المطاط الهندى الناعم . وفى أثناء حالتها المتماسكة قس عليها مربعات صغيرة ، كل منها ضلعه $\frac{1}{10}$ من البوصة فى كافة الاتجاهات . ضع دبابيس صغيرة فى أركان المربعات . تستطيع حينئذ أن تأخذ كإحداثيتين

٥
٤
٣ ب
٢
١
م ١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ ٨ ٩

لواحد من هذه الدبابيس ، عدد الدبابيس الذى نمر به حين نتجه يميناً من دبوس معين حتى نصل تحت الدبوس المذكور تماماً ، ثم عدد الدبابيس الذى نمر بها صاعدين إلى هذا الدبوس . ولتكن « م » فى الشكل هو الدبوس الذى نبدأ به ،

و « ب » هو الدبوس الذى سنحدد له الإحداثيتين و « ب » فى العمود الخامس، والصف الثالث ، وهكذا يكون إحداثيتاه فى قطعة المطاط الهندى هما ٥ ، ٣ .



والآن ، خذ قطعة المطاط ، ومطها ، والوها كما تشاء . واجعل الدبابيس الآن فى الصورة التى هى عليها فى الشكل الثانى . لم تعد التقسيمات الآن تمثل المسافات وفقا لأفكارنا المعتادة ، ولكنها ما برحت تستطيع القيام بدور الاحداثيات . وما زلنا نستطيع أن نأخذ «ب» على أن لها الإحداثيتين ٥ ، ٣ فى مسطح المطاط، ومازلنا نستطيع أن ننظر إلى قطعة المطاط على أنها سطح مستو ، على الرغم من أننا قد لويناه فلم تعد سطحاً مستوياً بالمعنى الذى ألفناه ، مثل هذه التشويهات المتصلة لا تؤثر فى شىء .

خذ مثلا آخر : بدلا من استخدام قضيب من الصلب لتحديد إحداثياتنا ، فلنستخدم ثعباناً حياً من السمك يتلوى طول الوقت . فلتكن المسافة من ذيل ثعبان السمك إلى رأسه هى رقم « ١ » من وجهة نظر الإحداثيات . أيا كان الشكل الذى يتخذه هذا الكائن فى هذه اللحظة . ثعبان سمك متصل ، والتواءاته مستمرة ومن ثم يمكن اتخاذه وحدتنا للمسافة فى تحديد الإحداثيات . ومنهج تحديد الإحداثيات — فيما عدا مطلب الاتصال — اتفاقى صرف ، ومن ثم فإن ثعباناً من السمك لا يختلف عن قضيب من الصلب .

ونحن ميالون إلى التفكير بأنه من المستحسن — للحصول على قياسات دقيقة حقاً — أن نستخدم قضيباً من الحديد ، بدل ثعبان من السمك . وهذا خطأ ، لا لأن ثعبان السمك ينبؤنا بما كان من المعتقد أن يخبرنا به قضيب الصلب ، ولكن لأن قضيب الصلب لا يخبرنا حقاً بأكثر مما يفعل

ثعبان السمك فى وضوح . والمسألة ليست هى أن ثعابين السمك جامدة حقا ، ولكن المسأله هى أن قضبان الصلب تتلوى حقيقة . وقد يبدو ثعبان السمك فى حالة واحدة ممكنة من حالات الحركة — إنه جامد بالنسبة لمشاهد ما ، بينما قد يبدو له أن قضيب الصلب يتلوى كما يتلوى ثعبان السمك بالنسبة لنا تماماً ، ولكن شخصاً يتحرك حركة مختلفـــة بالنسبة لهذا المشاهد وبالنسبة لنا ، قد يبدو له أن ثعبان السمك والقضيب يتلويان . وليس هناك ما يدعو إلى القول بأن هذا المشاهد مصيب وذاك المشاهد مخطىء . ففى مثل هذه المسائل ما يشاهد لا ينتمى إلى العمــــلية الفزيائية الملحوظة فحسب ، بل ينتمى أيضاً إلى موقف المشاهد . ولا تكشف قياسات المسافات والأزمنة كشفا مباشراً عن صفات الأشياء المقيسة ، ولكنها تكشف عن علاقات الأشياء بالشخص الذى يقيس ، وهكذا ما تستطيع المشاهدة أن تخبرنا به عن العالم الفزيائى ، أشد تجريداً مما كان مختقداً من قبل .

ومن المهم أن ندرك أن الهندسة — كما كانت تعلم فى المدارس منذ العصور اليونانية ، قد انقطعت عن الوجود بوصفها علماً منفصلا واندمجت الآن فى الفزياء . وقد كانت الفكرتان الرئيسيتان فى الهندسة الأولية هما الخط المستقيم والدائرة . وما يبدو لك على أنه طريق مستقيم — توجد كل أجزائه الآن — قد تبدو لمشاهد آخر كطيران الصاروخ ، أو نوعاً من المنحنى الذى تظهر أجزاؤه فى الوجود فى صورة متعاقبة . وتعتمد الدائرة على قياس المسافات ما دامت تتألف من جميع النقط الموجودة على مسافة معينة من مركزها . وقياس المسافات عبارة — كما سبق أن رأينا — عن مسألة ذاتية تعتمد على الطريقة التى يتحرك بها المشاهد . وإخفاق الدائرة فى أن تكون لها صحة موضوعية قد برهنت عليه تجربة ميكلسون — مورلى ، وعلى هذا تكون — بمعنى ما — نقطه البداية لنظرية النسبية بأسرها . والأجسام الجامدة التى نحتاج إليها فى القياس ليست جامدة إلا بالنسبة لمشاهدين معينين ، ولكنها بالنسبة للآخرين ستغير باستمرار أبعادها جميعا . وخيالنا العنيد المقيد بالأرض هو الذى يجعلنا نفترض إمكان قيام هندسة منفصلة عن الفزياء .

وهذا هو السبب الذى يجعلنا لا نتردد فى إضفاء دلالة فيزيائية على إحداثياتنا

منذ البداية . وقد كان من المفترض ـــ سابقاً ـــ أن الإحداثيات المستخدمة فى الفزياء ، عبارة عن مسافات تم قياسها بعناية ، وقد تحققنا الآن من أن هـــذه العناية لا يحسب لها حساب فى البداية ، وإنما تطلب فى مرحلة متأخرة . وليست إحداثياتنا الآن أكثر من طريقة منتظمة لتصنيف الحوادث ، غير أن الرياضيات، تزودنا ـــ فى منهج الكميات الممتدة tensors ـــ بتكنيك قوى قوة هائلة. بحيث نستطيع أن نستخدم الإحداثيات المحددة بهذه الطريقة المهملة ظاهرياً ، فى كفاءة ، وكأننا استخدمنا جهاز القياس الدقيق جداً فى الوصول إليها . وميزة الطريقة الجزافية فى البداية هى أنها تجعلنا نتحاشى وضع فروض فزيائية سريعة ، وهى فروض لا سبيل إلى تحاشيها إذا افترضنا أن لإحداثياتنا دلالة فزيائية أصلية معينة .

ولسنا بحاجة إلى محاولة التقدم . ونحن على جهل بكل الظواهر الفزيائية التى تدخل فى نطاق المشاهدة . فنحن نعرف أشياء معينة : نعرف أن الفزياء النيوتونية القديمة قريبة جداً من الدقة عندما نختار إحداثياتنا بطريقة معينة ، ونحن نعرف أن نظرية النسبية الخاصة ما زالت أشد قرباً من الدقة للإحداثيات المناسبة . ومن هذه الحقائق نستطيع أن نستنبط أشياء معينة من إحداثياتنا الجديدة التى تبدو ـــ فى قياس منطقى ـــ بوصفها مسلمات النظرية الجديدة .

ومن مثل هذه المسلمات نأخذ ما يلى :

(١) أن الفاصل بين حادثتين متجاورتين يأخذ شكلا عاماً ، كالشكل الذى استخدمه ريمان للمسافات .

(٢) أن كل جسم يسير على خط جيوديسى فى متصل الزمان ـــ مكان اللهم إلا من حيث إن القوى التى لا تنتمى إلى الجاذبية لا تؤثر عليه .

(٣) أن شعاع الضوء يسير فى خط جيوديسى بحيث يكون الفاصل بين أى جزءين فيه هو صفر .

وكل مسلمة من هذه المسلمات تتطلب شرحا .

وتقتضى مسلمتنا الأولى أنه إذا كانت حادثتان قريبتان إحداهما من الأخرى

(ولكنهما ليستا بالضرورة خلاف ذلك) فهناك فاصل بينهما يمكن أن يحسب من الفروق القائمة بين إحداثياتهما بمعادلة كالمعادلة التى عرضناها فى الفصل السابق . وهذا معناه أن نأخذ مربعات ونواتج فروق الإحداثيات ، ونضاعفها بمقادير مناسبة (والتى تتغير عامة من مكان إلى آخر) ، ثم نضيف النتائج معاً . والمجموع الذى نحصل عليه هو مربع الفاصل . ونحن لا نفترض مقدماً أننا نعرف المقادير التى ينبغى أن تضاعف بها المربعات والنواتج ، فهذا ما سنكتشفه بملاحظة الظواهر الفزيائية . ولكننا نعرف — لأن رياضيات ريمان قد بينت ذلك — أننا نستطيع داخل أية منطقة صغيرة من « متصل المكان — زمان » أن نختار الإحداثيات بحيث يكون للفاصل الشكل الخاص تماماً الذى نجده فى نظرية النسبية الخاصة . وليس من الضرورى لتطبيق النظرية الخاصة على منطقة محدودة ألا تكون ثمة جاذبية فى المنطقة ، بل يكفى أن تكون شدة الجاذبية واحدة — من الوجهة العملية — فى المنطقة كلها . . وهذا يمكننا من تطبيق النظرية الخاصة داخل أية منطقة صغيرة . أما مدى ما ينبغى أن تكون عليه من الصغر فيتوقف على المناطق المجاورة ، فعلى سطح الأرض ، ينبغى أن تكون من الصغر بحيث يمكن إهمال انحناءة الأرض . وفى الفضاء الممتد بين الكواكب ، ينبغى أن تكون صغيرة بما يكفى أن يجعل جاذبية الشمس والكواكب ثابتة ثباتاً معقولا فى المنطقة كلها . وفى الفضاء المنبسط بين النجوم ، قد تكون هائلة — فلتكن مثلا نصف المسافة من نجم إلى النجم الذى يليه — دون إدخال ضروب عدم الدقة التى يمكن قياسها .

وهكذا نستطيع — على مسافة بعيدة من المادة الجاذبة — أن نختار إحداثياتنا بحيث نحصل على ما يشبه المكان الإقليدى شبهاً كبيرا ، وهذه طريقة أخرى لكى نقول إن نظرية النسبية الخاصة قابلة للتطبيق . وفى جوار المادة — على الرغم من أننا ما زلنا نجعل مكاننا قريباً من المكان الإقليدى فى منطقة صغيرة جداً — فإننا لا نستطيع أن نفعل ذلك خلال أية منطقة تتنوع فيها الجاذبية تنوعاً محسوساً — أو على الأقل إذا فعلنا ذلك ، فعلينا أن نتخلى عن الرأى الذى عبرنا عنه فى المسلمة الثانية من أن الأجسام المتحركة تحت تأثير قوى جاذبة تتحرك فى خطوط جيوديسية فحسب .

وقد رأينا الخطوط الجيوديسية على سطح ما هى أقصر خط يمكن أن يرسم على السطح من نقطة إلى أخرى ؛ فمثلا الخطوط الجيوديسية على الأرض عبارة عن دوائر عظمى ، وحين نأتى إلى « متصل المكان — زمان » فإن الرياضيات هى نفسها ، بيد أن الشروح اللفظية هى التى تختلف نوعاً ما ، وفى نظرية النسبية العامة ، الحوادث المتجاورة هى التى يكون لها وحدها فاصل محدد مستقل عن الطريق الذى نسلكه للانتقال من الواحدة إلى الأخرى . أما الفاصل بين الحوادث المتبـــاعدة فيتوقف على الطريق الذى نسلكه ، ولابد أن يحسب بتقسيم الطريق إلى عدد من الأجزاء الصغيرة ثم بإضافة الفواصل الخاصة بهذا العدد من الأجزاء الصغيرة . فإذا كان الفاصل «مكانياً» لن يستطيع الجسم أن ينتقل من حادثة إلى أخرى ، وعلى هذا فإننا حين نكون بصدد الطريق الذى تتحرك فيه الأجسام ، نقتصر على الفواصل « الزمانية »، وسيبدو الفاصل بين حادثتين متجاورتين حين يكون «زمانياً» على أنه الزمن المنقضى بينهما فى نظر ملاحظ سافر من إحدى الحادثتين إلى الأخرى . وهكذا سيحكم الشخص الذى ينتقل من حادثة إلى الأخرى على الفاصل كله بين الحادثتين على أنه ما تظهره ساعاته على أنه الوقت الذى يستغرقه فى رحلته . وسيكون هذا الوقت أطول بالنسبة لبعض الطرق . وأقصر بالنسبة لبعضها الآخر . وكلما كان سفر الرجل أبطأ ، اعتقد أن الوقت الذى استغرقه فى رحلته أطول . ولكن لا ينبغى أن يؤخذ هذا القول على أنه جد سخافة ، فلست أقول إنك حين تسافر من لندن إلى إدنبرة فسيكون الوقت الذى تستغرقه أطول إذا سافرت بسرعة أبطأ ، ولكننى أقول شيئاً أغرب من ذلك كثيراً . إننى أقول إنك إذا غادرت لندن فى الساعة العاشرة صباحاً ووصلت إلى إدنبره فى الساعة السادسة والنصف بعد الظهر — بتوقيت جرينتش ، كلما كان سفرك أبطأ كان الوقت الذى تستغرقه أطول ، إذا حكمت على الزمن بساعتك وهذه قضية مختلفة أشد الاختلاف . فإنه من وجهة نظر شخص على الأرض ، تستغرق رحلتك ثمانى ساعات ونصفاً . ولكن ، لو أنك كنت شعاعاً من الضوء يدور حول النظام الشمسى ، ويبدأ من لندن فى الساعة العاشرة صباحاً ، وينعكس من المشترى إلى زحل ، وهكذا دواليك ، حتى ترتد فى النهاية إلى أدنبرة ، ووصلت هناك فى الساعة السادسة والنصف مساء ، فسوف تحكم بأن الرحلة لم تستغرق أى

زمن على الإطلاق . وإذا سلكت أى طريق دائرى ، أمكنك أن تصل فى الموعد المحدد لسفرك بسرعة ، فكلما كان طريقك أطول ، كان الوقت الذى تحكم بأنك قطعته أقل ، وسيكون تقليل الزمان مستمرا كلما اقتربت سرعتك من سرعة الضوء . والآن ، أقول إنه حين يتحرك جسم ، وحين يترك لنفسه ، فإنه يختار الطريق الذى يجعل الزمن بين مرحلتين من مراحل الرحلة أطول ما يمكن . وإذا انتقل من حادثة إلى أخرى بأى طريق آخر ، فإن الزمن ، كما يقيسه بساعاته الخاصة لابد أن يكون أقصر . وهذه طريقة تؤدى إلى القول بأن الأجسام إذا تركت لنفسها فإنها تقوم برحلاتها بأبطأ ما فى وسعها ، إنه نوع من قانون الخمول الكونى . وتعبيره الرياضى هو أن الأجسام تنتقل فى خطوط جيوديسية يكون فيها الفاصل الإجمالى بين آية حادثتين فى الرحلة ، أكبر من أى طريق بديل . (وترجع حقيقة أنه أكبر وليس أقل إلى أن نوع الفاصل الذى نحن بصدده أشد مماثلة للزمان منه للمسافة .) وإذا استطاع شخص ـــ مثلا ـــ أن يغادر الأرض ، ويسافر فترة ، ثم يعود ، فإن الزمن المنقضى بين رحيله وعودته سيكون أقل إذا سجلته ساعات الأرض : فالأرض فى رحلتها حول الشمس تختار الطريق الذى يجعل زمن أى جزء من رحلتها ـــ مقيسا بساعاتها ـــ أطول من أى زمن ، تحكم به الساعات التى تتحرك فى طريق مختلف . وهذا ما نعنيه بقولنا إن الأجسام إذا تركت لنفسها فإنها تتحرك فى خطوط جيوديسية فى فى متصل الزمان ـــ مكان .

ومن المهم أن تتذكر أن متصل « الزمان ـــ مكان » ليس من المفروض أن يكون إقليدياً . ومن حيث إن الأمر يتعلق بالخطوط الجيوديسية فإن هذا يؤدى إلى أن متصل « الزمان ـــ مكان » أشبه بالريف الجبلى . فإلى جوار قطعة من المادة ، هناك تل من « الزمان ـــ مكان » ، وهذا التل يزداد انحداراً كلما اقترب من القمة ، كعنق زجاجة الشمبانيا ، وينتهى إلى مجرد هوة . والآن ، فإنه وفقا لقانون الخمول الكونى الذى ذكرناه آنفاً ـــ فإن جسما يأتى الى جوار التل ، لن يحاول أن يصعد مباشرة إلى القمة ، ولكنه سيدور حول التل . هذه هى ماهية رأى أينشتين فى الجاذبية . فما يفعله جسم ما ، فإنما يفعله بسبب طبيعة « متصل الزمان ـــ مكان » فى المنطقة المجاورة له ، لا بسبب قوة غامضة تنبعث من جسم بعيد .

وربما استطاعت هذه المماثلة أن تجعل هذه النقطة واضحة .. فلنفترض أن عدداً من الرجال — يسيرون فى ليلة مظلمة — وقد حملوا المصابيح فى أيديهم فى اتجاهات شتى عبر سهل متسع الأرجاء ، ولنفترض أنه فى جزء من هذا السهل هناك تل قد وضعت على قمته منارة متوهجة . وهذا التل هو كما وصفناه — يزداد انحداراً كلما ارتفع نحو القمة ، وينتهى بهاوية . وسأفترض أن هناك قرى متناثرة على هذا التل ، وأن هؤلاء الرجال الذين يحملون المصابيح يذرعون هذه القرى ذهاباً وإياباً . ولقد شقت المسالك لتبين أسهل طريقة للانتقال من قرية إلى أخرى - وهذه المسالك أقل أو أكثر انحناء ، حتى تتحاشى التوغل فى التل ، وستكون أشد حدة فى الانحناء حين تمر بالقرب من قمة التل ، منها حين تبتعد عنه مسافة ما ، ولنفترض الآن أنك تلاحظ هذا كله — بأقصى ما فى وسعك — من مكان مرتفع فى بالون ، بحيث لا تستطيع أن ترى الأرض ، وإنما ترى المصابيح والمنارة فحسب ، وحينئذ لن تعرف أن هناك تلا ، أو أن هناك منارة فوق قمته ، بل سترى أن الناس يتحولون عن الطريق المستقيم حين يقتربون من المنارة ، وكلما ازداد اقترابهم ازداد تحولهم عنها . ومن الطبيعى أن تعزو ذلك إلى تأثير المنارة ، وربما اعتقدت أنها ساخنة جداً ، وأن الناس يخشون الاحتراق منها . ولكنك إذا انتظرت ضوء النهار ، فسوف ترى التل ، وستجد أن المنارة تميز قمة التل فحسب ، وأنها لا تؤثر على حاملى المصابيح أى تأثير .

وفى هذا التشبيه ، تناظر المنارة الشمس ، ويناظر حاملو المصابيح الكواكب والشهب ، والمسالك تناظر أفلاك الكواكب والشهب ، وظهور ضوء النهار يناظر مجىء أينشتين . ويقول أينشتين إن الشمس على قمة تل ، كل ما فى الأمر أن هذا التل فى متصل « الزمان — مكان » لا فى المكان وحده . (وأنا أنصح القارىء ألا يصور لنفسه هذا القول ، لأنه مستحيل .) وكل جسم يتخذ فى كل لحظة — أيسر طريق مفتوح له ، نظراً لوجود التل ، فإن أيسر طريق ليس خطاً مستقيماً ، وكل قطعة صغيرة من المادة قائمة على قمة تلها الصغير ، كالديك الواقف على كومته من الروث . وما نسميه قطعة كبيرة من المادة عبارة عن قمة تل كبير . والتل هو ما نعرفه ، أما قطعة المادة الموجودة على القمة فنفترضها إيثاراً للراحة . وربما لم تكن ثمة حاجة حقيقية لافتراضها ، وكنا نستطيع أن نكتفى بالتل

وحده ، لأننا لن نستطيع أن نصعد إلى قمة تل أى شخص آخر ، تماماً كما لا يستطيع الديك الشرس أن يقاتل الطائر المثير على وجه الخصوص — الذى يراه فى المرآة .

ولقد أعطيت وصفاً كيفياً فحسب لقانون أينشتين فى الجاذبية ، أما أن أعطى صيغتها الكمية المضبوطة ، فأمر محال لا أسمح به لنفسى دون مزيد من الرياضة. وأطرف نقطة فى هذه الصيغة هى أنها لا تجعل القانون نتيجة للتأثير عن بعد ، فالشمس لا تؤثر بأية قوة على الكواكب . وكما أن الهندسة قد أضحت فزياء ، فكذلك ، أصبحت الفزياء بمعنى ما — هندسة . ولقد أصبح قانون الجاذبية هو القانون الهندسى القائل بأن كل جسم يسلك أسهل سبيل من مكان إلى مكان ، غير أن هذا السبيل يتأثر بالتلال والوديان التى يلتقى بها فى الطريق .

ولقد افترضنا أن الجسم — موضع البحث — لا تؤثر عليه إلا قوى الجاذبية فحسب ، ونحن مهتمون فى الوقت الحاضر بقانون الجاذبية ، لا بتأثيرات القوى الكهرومغناطيسية ، أو القوى الموجودة بين جسيمات الذرة الثانوية . وقد بذلت محاولات عديدة لإدخال تلك القوى جميعاً داخل إطار نظرية النسبية العامة على يد أينشتين نفسه، وعلى يد ڤيل Weyl وكالوتسا Kaluza وكلاين Klein وكثيرين غيرهم ، بيد أن واحدة من هذه المحاولات لم تكن مرضية تماماً . ويمكن أن نتجاهل فى الوقت الحاضر — هذه الأعمال ، لأن — الكواكب ليست موضوعاً — بوصفها وحدات كلية — لقوى كهرومغناطيسية أو ذرية ثانوية يمكن تقديرها ، وإنما يجب أن يحسب حساب الجاذبية وحدها فى حساب حركاتها ، وهى الحركات التى تعرضنا لها فى هذا الفصل .

ومسلمتنا الثالثة القائلة بأن شعاع الضوء يتحرك بحيث يكون الفاصل بين جزئين منه هو صفر ، هذه المسلمة لها ميزة وهى أنها يمكن ألا تطلق على المسافات « الصغيرة » فحسب . فإذا كان كل جزء صغير من البرهة هو صفر ، فإن مجموع الأجزاء جميعاً يساوى صفراً ، وهكذا تكون الأجزاء البعيدة من نفس شعاع الضوء ذات فاصل مقداره صفر . والطريق الذى يسلكه شعاع الضوء هو خط جيوديسى أيضاً ، وفقاً لهذه المسلمة . وهكذا نجد لدينا الآن وسيلتين تجريبيتين

للكشف عما تعنيه الخطوط الجيوديسية فى متصل الزمان ــ مكان» ، هما أشعة الضوء ، والأجسام التى تتحرك فى حرية . ومن بين الأجسام ذات الحركة المتحررة تدخل جميع الأجسام التى ليست خاضعة ــ بوصفها وحدات كلية ــ لقوى كهرومغناطيسية أو ذرية ثانوية يمكن تقديرها ، أعنى الشمس والنجوم والكواكب والأقمار التابعة وكذلك الأجسام الساقطة على الأرض ، حين تقع على أقل تقدير ــ فى فراغ ، . وأنت حين تقف على الأرض ، تكون خاضعاً لقوى كهرومغناطيسية : ذلك أن الإلكترونات والبروتونات المجاورة لقدميك تمارس قوة «طاردة» على قدميك كافية للتغلب على جاذبية الأرض . وهذا ما يمنعك من السقوط خــــلال الأرض ، التى ، وإن تكن تبدو صلبة ، إلا أنها فى معظمها مكان خاو .

الفصل التاسع

براهين على قانون أينشتين للجاذبية

الأسباب التى تدعو إلى قبول قانون أينشتين للجاذبية بدلا من قانون نيوتن ، تجريبية فى جزء منها ، منطقية فى جزئها الآخر ، وسنبدأ بالجزء التجريبى .

يعطى قانون أينشتين للجاذبية نفس النتائج التى يعطيها قانون نيوتن عندما يطبق على حساب أفلاك الكواكب وتوابعها . ولو لم تكن كذلك ، لما أمكن أن تكون صادقة ، مادامت النتائج المستنبطة من قانون نيوتن قد وجد أنها مضبوطة بعد التحقق من صدقها بالمشاهدة . وحين نشر أينشتين قانونه الجديد لأول مرة عام ١٩١٥ ، لم تكن هناك غير واقعة تجريبية واحدة يستطيع أن يثبت بها أن نظريته أفضل من نظرية نيوتن ، وهذه الواقعة هى مايسمى حركة نقطة رأس عطارد .

ويدور الكوكب عطارد — كغيره من الكواكب السيارة — حول الشمس فى قطع ناقص بحيث تكون الشمس فى إحدى البؤرتين . ولهذا فإنه فى بعض النقط من فلكه يكون أقرب إلى الشمس منه فى النقاط الأخرى . والنقطة التى يكون فيها أقرب مايكون إلى الشمس تسمى «نقطة الرأس» perihelion ، وقد وجد بطريق المشاهدة — من إحدى المناسبات حين يكون عطارد أقرب مايكون إلى الشمس حتى المناسبة التالية — وجد أن عطارد لايدور مرة واحدة تماماً حول الشمس ، بل أكثر قليلا . وهذا الانحراف طفيف جداً ، إذ يصل إلى زاوية مقدارها اثنتان وأربعون ثانية كل قرن من الزمان . ولما كان عطارد يدور حول الشمس مايزيد على أربعمائة مرة كل قرن ، فلابد أن يتحرك بما يزيد على $\frac{1}{10}$ ثانية من الزاوية عن الدورة الكاملة لكى يصل من نقطة الرأس ، إلى نقطة الرأس التالية . وقد حار الفلكيون فى هذا الانحراف الطفيف جداً عن نظرية نيوتن . وكان هناك تأثير محسوب يرجع إلى اضطرابات تحدثها الكواكب الأخرى ، بيد أن هذا الانحراف الطفيف كان المتبقى بعد حساب هذه الاضطرابات . وقد فسرت نظرية

أينشتين هـذا المتبقى تفسيراً مضبوطاً . وهناك تأثير مماثل فى حالة الكواكب الأخرى، بيد أنه أقل ، وأصعب على المشاهدة . ومنذ أن نشر أينشتين قانونه الجديد ، لوحظ هذا التأثير أيضاً بالنسبة الأرض ، وبدرجة معقولة من اليقين بالنسبة للمريخ . وكان تأثير نقطة الرأس هذا هو — فى أول الأمر — الميزة التجريبية الوحيدة التى تفوق بها أينشتين على نيوتن .

وكان نجاحه الثانى أشد من ذلك إثارة . فالضوء فى الفراغ ينبغى أن يتحرك دائماً — وفقاً للرأى التقليدى — فى خطوط مستقيمة ، ولما لم يكن مؤلفاً من جسيمات مادية ، فينبغى ألا يتأثر بالجاذبية وأياً كان الأمر ، فقد كان من الممكن ، دون خروج خطير على الأفكار القديمة — أن نقبل أن ينحرف الضوء — فى عبوره قرب الشمس — عن طريقه المستقيم بنفس الدرجة التى ينحرف بها لو أنه كان مؤلفاً من جسيمات مادية . وقد ذهب أينشتين — على أية حال — إلى أن الضوء ينبغى أن ينحرف ضعف هذا الانحراف ، مستنتجاً ذلك من قانونه فى الجاذبية . وهذا معناه ، لو أن الضوء المنبعث من نجم مر قريباً جداً من الشمس ، فإن أينشتين يرى أن الشعاع المنبعث من النجم سيتحول خلال زاوية مقدارها اقل من ثانية وثلاثة أرباع الثانية . وكان خصومه على استعداد لقبول نصف هـــذا المقدار . ولكن ، ليس من الممكن أن نرى كل يوم نجماً يكاد يكون فى خط واحد مع الشمس ، وإنما لايكون ذلك ممكناً إلا فى أثناء كسوف كلى، بل إنه قد لايكون ممكناً دائماً فى هذه الحالة ، إذ قد لاتكون هناك نجوم لامعة فى الموقع الصحيح . وقد ذكر إدنجتون أن أفضل يوم فى العام — من وجهة النظر هذه — هو يوم ٢٩ مايو ، إذ يوجد حينذاك عدد من النجوم المتألقة القريبة من الشمس. وحدث — من قبيل حسن الحظ الذى لايكاد يصدق — كسوف كلى للشمس يوم ٢٩ مايو سنة ١٩١٩ . وصورت بعثتان بريطانيتان النجوم القريبة من الشمس فى أثنـــاء الكسوف ، وأيدت النتائج تنبؤ أينشتين . واقتنع بعض الفلكيين الذين ظلوا يرتابون فيما إذا كانت الاحتياطات الكافية قد اتخذت لضمان الدقة .. اقتنعوا حين أعطت مشاهداتهم الخاصة فى كسوف تال نفس النتيجة تماماً . وقد أكدت نتائج المشاهدات فى عديد من الحالات التالية من الكسوف تقدير أينشتين الذى أصبح الآن مقبولا من الجميع .

والاختبار التجريبي الثالث مؤيد في جملته لأينشتين ، بيد أن المقادير — موضع الاختبار — صغيرة إلى درجة أنه من الممكن بصعوبة قياسها فحسب ، ولهذا فإن النتيجة ليست حاسمة . وقبل أن نشرح هذا التأثير ، لابد من شروح تمهيدية قليلة . يتألف طيف عنصر من العناصر من عدد معين من خطوط الضوء ذات شتى الألوان التي تنبعث من العنصر حين يتوهج ، ويمكن فصلها بمنشور . وهذه الخطوط هي نفسها (على وجه التقريب الشديد) سواء أكان العنصر على الأرض ، أم على الشمس ، أم على نجم من النجوم . وكل خط عبارة عن ظل محدد من اللون ، بموجة محددة ذات طول معين . والموجات الأطول تتجه نحو الطرف الأحمر للطيف ، والأقصر نحو الطرف البنفسجي . وحين يكون مصدر الضوء متحركاً نحوك فإن أطوال الموجات الظاهرة تزداد قصراً ، كما تزداد سرعة موجات البحر عندما تكون مبحراً ضد الريح . وحين يكون مصدر الضوء متحركاً بحيث يبتعد عنك ، فإن أطوال الموجات الظاهرة تزداد طولا ، للسبب عينه . وهذا يمكننا من معرفة ما إذا كانت النجوم تتحرك نحونا ، أو بعيداً عنا . ذلك أنها إذا كانت تتحرك نحونا ، فإن خطوط الطيف جميعاً لعنصر ما ، تتحرك قليلا صوب البنفسجي ، وإذا كانت تتحرك بعيداً عنا ، فإن تلك الخطوط تتحرك صوب الأحمر . وقد تلحظ ذات يوم تأثيراً مماثلا للصوت ، فإذا كنت في محطة ، وأقبل قطار وهو يصفر ، فإن نغمة الصفارة تبدو أشد حدة حين يقترب منك القطار ، منها حين يكون قد مر ومن المحتمل أن كثيراً من الناس يعتقدون أن النغمة قد تغيرت «حقيقة» ، والواقع أن التغيير الذي تسمعه راجع إلى أن القطار كان يقترب أولا ، ثم يبتعد . أما بالنسبة لراكبي القطار ، فليس ثمة تغيير في النغمة . وليس هذا هو التأثير الذي يهتم به أينشتين . فالمسافة بين الشمس والأرض لا تتغير كثيراً ، ويمكن أن ننظر إليها — بالنسبة لأغراضنا الحالية — على أنها ثابتة . ويستنتج أينشتين من قانونه في الجاذبية أن أية عملية دورية تأخذ مكانها في ذرة ما من الشمس (التي تعد جاذبيتها شديدة جداً) ينبغي — كما تقاس بساعاتنا — أن تحدث بسرعة أبطأ قليلا من السرعة التي تحدث بها في ذرة مماثلة على الأرض . و «الفاصل» المتعلق بالموضوع سيكون هو نفسه بالنسبة للشمس والأرض على السواء ، غير أن نفس

الفاصل فى مناطق مختلفة لا يناظر نفس الوقت تماما ، وهذا راجع للطبيعة «الجبلية» التى يتسم بها متصل « المكان — زمان » وهو الذى يؤلف الجاذبية . وبالتالى ، فإنه لابد لأى خط معين فى الطيف — عندما يأتى الضوء من الشمس — أن يبدو لنا أقرب قليلا إلى الطرف الأحمر للطيف ، منه حين يكون قادماً من مصـــدر على على الأرض . والتأثير الذى تتوقعه ضئيل جداً — ضئيل جداً إلى درجة أن عدم اليقين من وجوده أو عدم وجوده مابرح قائماً . وتتنبأ نظرية أينشتين بتأثير مماثل لكل نجم ، غير أن الصعوبات التكنيكية لقياس هذا التأثير عظيمة إلى درجة أننا بعد أربعين سنة من تجميع المشاهدات مازلنا لانستطيع التأكد من وجوده ...

ولم تكتشف منذ ذلك الحين — أية اختلافات قابلة للقياس بين نتائج قانون أينشتين ونتائج قانون نيوتن ، على الأقل ، فيما يتعلق بالنظام الشمسى . بيد أن الاختبارات التجريبيـة السابقة كافيـة لإقناع الفلكيين بأنه حيث يختلف نيوتن وأينشتين على حركة الأجرام السماوية ، فإن قانون أينشتين هو الذى يعطى النتائج الصحيحة . وحتى لو قامت الأسس التجريبية المؤيدة لأينشتين وحدها ، فإنها مع ذلك حاسمة . وسواء أكان قانونه يمثل الحقيقة المضبوطة تماماً أم لا ، فإنه بكل تأكيد أقرب إلى الدقة من قانون نيوتن ، وإن تكن ضروب عدم الدقة فى قانون نيوتن ضئيلة كلها إلى أقصى حد .

غير أن الاعتبارات التى قادت فى الأصل أينشتين إلى قانونه لم تكن من هذا النوع التفصيلى . وحتى النتيجة الخاصة بنقطة رأس الكوكب عطارد ، التى أمكن التحقق من صدقها فى الحال بوساطة المشاهدات السابقة ، لايمكن استنتاجها إلا بعد اكتمال النظرية ، كما أنها لايمكن أن تكون أى جزء من الأسس الأصلية لابتكار مثل هذه النظرية . فقد كانت هذه الأسس ذات طابع منطقى أشد تجريداً . ولا أعنى بذلك أنها لم تكن مؤسسة على حقائق مشاهدة ، كما لا أعنى أنها كانت تهويمات « قبلية » a priori كالتهويمات التى انغمس فيها الفلاسفة فى عصور سابقة ، وإنما ما أعنيه هو أنها مشتقة من سمات عامة معينة تتصف بها التجربة الفزيائية ، سمات بينت أن نيوتن لابد أن يكون مخطئاً ، وأن قانوناً كقانون أينشتين «يجب» أن يحل محله .

والحجج المؤيدة لنسبية الحركة — هي كما رأينا في الفصول الأولى — حاسمة تماماً . ففي الحياة اليومية ، عندما نقول إن شيئاً ما يتحرك ، فإننا نعني أنه يتحرك بالنسبة الأرض ، وحين نتعرض لحركات الكواكب ، فإننا ننظر إليها بوصفها متحركة بالنسبة للشمس ، أو لمركز كتلة النظام الشمسي . وعندما نقول إن النظام الشمسي نفسه يتحرك ، فإننا نقصد أنه يتحرك بالنسبة للنجوم . وليست هناك واقعة فزيائية يمكن أن نطلق عليها اسم « الحركة المطلقة » ، ومن ثم ، ينبغي أن تعنى الفزياء بالحركات النسبية ، مادامت هذه الحركات هي النوع الوحيد الذي يحدث .

سنأخذ الآن نسبية الحركة في ارتباطها بالواقعة التجريبية التي مؤداها أن سرعة الضوء هي نفسها بالنسبة لجسم ، أو بالنسبة لآخر ، أياً كانت حركة هذين الجسمين . وهذا يؤدي بنا إلى نسبية المسافات والأزمنة . وهذا بدوره يبين أنه لاوجود لواقعة فزيائية موضوعية يمكن أن تسمى « المسافة بين جسمين في زمن معين » ، مادام كل من الزمان والمسافة سيعتمد على المشاهد . وعلى هـذا فإن قانون نيوتن للجاذبية متهافت من الناحية المنطقية ، مادام يستخدم عبارة « المسافة في زمن معين » .

وهذا يبين لنا أننا لانستطيع أن نظل قانعين بنيوتن ، ولكنه لايبين لنا ماذا نستطيع أن نضع مكانه . وهنا تتدخل عدة اعتبارات ، فلدينا في المقام الأول مايسمى « مساواة كتلة الجاذبية والقصور الذاتي » ، وهذا يعني الآتي : عندما تستخدم قوة معينة (١) للتأثير على جسم ثقيل ، فإنك لاتعطيه من السرعة ماتعطيه لجسم خفيف . ومايسمى كتلة القصور الذاتي inertial للجسم تقاس بمقدار القوة المطلوبة لإحداث سرعة معينة . و « الكتلة » — في نقطة معينة على سطح

---

(١) على الرغم من أن « القوة » لم تعد واحدة من التصورات الأساسية في علم الديناميكا بل مجرد طريقة مريحة للكلام ، فإنه مازال من الممكن استخدامها كعبارتي « شروق الشمس » « وغروب الشمس » على شرط أن نكون مدركين لما نعنيه . ذلك أن الأمر يتطلب في كثير من الأحايين تغييرات ملتوية جداً لتحاشي كلمة (قوة) . المؤلف

الأرض ـ تتناسب مع « الوزن » . ومايقاس بالموازين هو الكتلة ، لا الوزن: والوزن يعرف بأنه القوة التى تجذب بها الأرض الجسم . وهذه القوة أعظم عند القطبين منها عند خط الاستواء ، لأن دوران الأرض عند خط الاستواء يحدث قوة طاردة مركزية مضادة للجاذبية إلى حد ما . وقوة جذب الأرض أعظم أيضاً على سطح الأرض منها على ارتفاع كبير أو فى قاع منجم شديد العمق . ولا تظهر الموازين شيئاً من هذه التنوعات ، لأنها تؤثر على الأوزان المستخدمة تأثيرها على الجسم الموزون : ولكنها تظهر إذا استخدمنا ميزاناً زنبركياً . أما الكتلة فلا تتغير خلال هذه التغيرات فى الوزن .

وتعرف الكتلة الجاذبة تعريفاً مختلفاً . وهى قابلة لمعنيين : فقد تعنى (١) الطريقة التى يتجاوب بها جسم ما فى موقف تكون فيه الجاذبية معروفة الشدة ، مثل سطح الأرض أو سطح الشمس ، أو قد تعنى (٢) شدة القوة الجاذبة التى يحدثها الجسم ، كأن تحدث الشمس قوى جاذبة أقوى مما تحدثه الأرض ويقول نيوتن إن قوة الجاذبية بين جسمين تتناسب مع حاصل ضرب كتلتيهما . فلننظر الآن فى جذب الأجسام المختلفة لجسم واحد بعينه ، وليكن الشمس ، فى هذه الحالة تجتذب الأجسام المختلفة بقوى تتناسب مع كتلها ، وتحدث ـــ من ثم ، نفس السرعة فيها جميعاً . وهكذا إذا كنا نقصد « الكتلة الجاذبة » بالمعنى (١) ، أى الطريقة التى يتجاوب بها الجسم مع الجاذبية ، فإننا نجد أن « مساواة كتلة القصور الذاتى وكتلة الجاذبية » ـــ التى تبدو شيئاً هائلا ـــ وقد استحالت إلى هذا : إنه فى موقف جاذبى معين ، تسلك الأجسام جميعاً سلوكاً واحداً بعينه . وقد كان هذا الكشف ـــ بالنسبة لسطح الأرض ـــ من أول الكشوف التى قام بها جاليليو . وكان أرسطو يعتقد أن الأجسام الثقيلة تسقط بسرعة أكبر من الأجسام الخفيفة . وأثبت جاليليو أن الأمر ليس كذلك إذا حذفت مقاومة الهواء . فالريشة تسقط ـــ فى الفراغ ـــ بسرعة كتلة من الرصاص . أما فيما يتعلق بالكواكب ـــ فقد كان نيوتن هو الذى أقر الحقائق المتناظرة . فالشهاب الذى له كتلة صغيرة جداً ، يعانى نفس السرعة ـــ إذا كان على مسافة معينة من الشمس ـــ متجها نحو الشمس ، التى يعانيها كوكب على نفس المسافة . وهكذا تتوقف الطريقة التى

تؤثر بها الجاذبية على جسم ما — تتوقف على المكان الذى يوجد فيه الجسم فحسب ، لا على طبيعة الجسم بحال من الأحوال — وهذا يوحى بأن تأثير الجاذبية سمة من سمات « المحلية » التى هى ما يصنعها أينشتين .

أما فيما يتعلق بالكتلة الجاذبة بالمعنى (٢) الخاص بشدة القوة التى يحدثها جسم ما ، فإن هذه لم تعد متناسبة « تماماً » مع كتلتها من حيث القصور الذاتى . وتقتضى هذه المسألة الإلمام برياضيات معينة ، ولهـــذا سأمتنع عن الخوض فيها [١] .

ولدينا إشارة أخرى إلى النوع الذى « ينبغى » أن يكون عليه قانون الجاذبية ، هذا إذا كان سمة من سمات الجوار ، كما رأينا السبب الذى يدعونا إلى افتراض ذلك . فلابد أن يتم التعبير عنه فى قانون لا يتغير حين نتخذ نوعاً مختلفاً من الإحداثيات. ورأينا أنه لا ينبغى علينا — كبداية — أن ننظر إلى إحداثياتنا على أنها تمتلك أية دلالة فزيائية : فهى مجرد طرائق منظمة لتسمية الأجزاء المختلفة من متصل الزمان — مكان . ولما كانت « مجرد اصطلاح » Conventional فهى لا يمكن أن تدخل فى القوانين الفزيائية وهذا معناه القول بأننا إذا عبرنا عن قانون تعبيراً صحيحاً فى حدود مجموعة من الإحداثيات ، فانه ينبغى أن يتم التعبير عنه بنفس الصيغة فى حدود مجموعة أخرى من الإحداثيات . أو إن شئنا مزيداً من الدقة — لابد أن يكون من الممكن إيجاد صيغة تعبر عن القانون ، ولا تتغير بتغير الإحداثيات ، ومن مهمة نظرية الكميات الممتدة أن تتناول مثل هذه الصيغ . وتثبت هذه النظرية أن هناك صيغة واحدة ، توحى فى جلاء بأنها من المحتمل أن تكون قانون الجاذبية . وحين تفحص هذه الإمكانية نجد أنها تعطى النتائج الصحيحة ، وهنا تتدخل التأكيدات التجريبية ، ولكن ، إذا كنا لم نجد أن قانون أينشتين متفق مع التجربة ، لما استطعنا — مع ذلك — أن نرجع إلى قانون نيوتن ، ونكون مرغمين حينذاك بوساطة المنطق

---

(١) انظر . أدنجتون ، « النظرية الرياضية للنسبية » الطبعة الثانية ، ص ١٢٨ .

على البحث عن قانون يتم التعبير عنه فى حدود الكميات الممتدة ومن ثم يكون مستقلا عن اختيارنا للإحداثيات . ومن المحال — بدون الرياضة — أن نشرح نظرية الكميات الممتدة ، وينبغى أن يقنع الشخص غير الرياضى بأن يعرف أنها المنهج التكنيكى الذى نحذف به العنصر الاتفاقى من قياساتنا وقوانيننا ، وعلى هذا النحو نصل إلى قوانين فزيائية مستقلة عن وجهة نظر المشاهد . ويعد قانون أينشتين للجاذبية أروع مثل على هذا المنهج .

الفصل العاشر

الكتلة وكمية التحرك والطاقة والفعل

السعى وراء الدقة الكمية ملح بقدر ما هو هام . والقياسات الفزيائية تجرى بدقة غير عادية ، فلو أنها أجريت فى عناية أقل لما اكتشفت قط الانحرافات الطفيفة التى تتألف منها المعطيات التجريبية لنظرية النسبية . وقد كانت الفزياء الرياضية تستخدم — قبل ظهور النسبية — مجموعة من التصورات التى كان من المفروض أن تكون دقيقة دقة القياسات الفزيائية ، غير أن الأمر تكشف عن أنها كانت معيبة من الناحية المنطقية ، وأن هذه العيوب قد أظهرت نفسها فى الانحرافات الطفيفة جداً عن التوقعات القائمة على الحساب . وفى هذا الفصل أريد أن أبين كيف تأثرت الأفكار الأساسية فى الفزياء قبل — النسبية ، وما هى التعديلات التى ينبغى أن تطرأ عليها .

لقد أتيحت لنا من قبل فرصة الحديث عن الكتلة . والكتلة — تمشياً مع أغراض الحياة اليومية — هى نفسها الوزن ، ومقاييس الوزن العادية من أوقيات وجرامات . . . إلخ — هى حقا مقاييس الكتلة . ولكننا ، ما أن نبدأ بإجراء قياسات دقيقة ، حتى نجد أنفسنا مرغمين على التفرقة بين الكتلة والوزن . وهناك منهجان مختلفان للوزن فى الاستعمال العادى ، أحدهما بالموازين (العادية) ، والآخر بالميزان الزنبركى . وحين تقوم برحلة ، ويوزن متاعك ، لا يوضع هذا المتاع على ميزان بكفتين ، بل على ميزان زنبركى ، والوزن يضغط على الزنبرك بمقدار معين ، وتظهر النتيجة بوساطة إبرة على قرص مرقوم . وهذا المبدأ نفسه مستخدم فى الآلات الأوتوماتيكية للحصول على وزنك . والميزان الزنبركى يبين الوزن ، أما الموازين فتبين « الكتلة » . ولا أهمية لهذا الاختلاف ما دمت باقياً فى شطر من العالم ، ولكن ، لو أنك اختبرت آلتين للوزن من نوعين مختلفين فى عدد من الأماكن المختلفة ، فستجد أن نتائجهما — إذا كانتا دقيقتين — لا تتفق

دائماً . أما الموازين العادية فستعطيك نفس النتيجة حيثما كنت ، أما الميزان الزنبركى فلن يعطيك نفس النتيجة دائماً . وهذا معناه ، إذا كان لديك قالب من الرصاص يزن ١٠ أوقيات بالميزان العادى فسيزن دائماً بالميزان ذى الكفتين عشر أوقيات ، فى كل مكان من العالم . أما إذا كان يزن عشر أوقيات بميزان زنبركى فى لندن ، فسيزن أكثر من ذلك فى القطب الشمالى ، وأقل من ذلك عند خط الاستواء ، وأقل من ذلك أيضاً فى طائرة مرتفعة ، وأقل فى قاع منجم للفحم، إذا وزنت فى تلك الأماكن جميعا بنفس الميزان الزنبركى . والواقع أن الأداتين تزنان كميات مختلفة تمام الاختلاف . فالميزان العادى يزن ما يمكن أن يسمى (بغض النظر عن التدقيقات التى سنلتفت إليها الآن) كمية المادة quantity of matter فهناك كمية من المادة فى رطل من الريش تعادل كمية المادة فى رطل من الرصاص . والأوزان المعيارية التى هى « كتل معيارية » حقاً ستزن كمية الكتلة فى أية مادة توضع فى الكفة المقابلة . غير أن « الوزن» صفة راجعة إلى جاذبية الأرض . إنها مقدار القوة التى تجذب بها الأرض جسماً ما . وهذه القوة تتباين من مكان إلى مكان : فهذه الجاذبية تختلف — فى المقام الأول — فى أى مكان خارج الأرض — بعكس مربع المسافة عن مركز الأرض ، ومن ثم فإنها أقل فى مناطق الجو العليا . وثانيا : حين تهبط إلى منجم للفحم ، فإن جزءاً من الأرض يكون فوقك ، وبالتالى فإنه يجذب المادة إلى أعلى بدلا من أن يجذبها إلى أسفل ، بحيث يكون صافى الجاذبية إلى أسفل أقل منها على ظهر الأرض . وثالثا : نظراً لدوران الأرض ، هناك ما يسمى « القوة الطاردة المركزية » وهى تعمل ضد الجاذبية . وهذه القوة تبلغ أقصاها عند خط الاستواء ، لأن دوران الأرض فى هذه المنطقة يقتضى أسرع حركة الأرض . ولا وجود لهذه القوة عند القطبين لأنهما موجودان على محور الدوران . ولهذه الأسباب جميعاً ، فإن القوة التى ينجذب بها جسم ما إلى الأرض يختلف قياسها فى الأماكن المختلفة . وهذه القوة هى ما يقيسه الميزان الزنبركى وهذا هو ما يجعل الميزان الزنبركى يعطى نتائج مختلفة فى الأماكن المختلفة . أما فى حالة الموازين العادية فإن الأوزان المعيارية (الصنج) تتغير كما تتغير الأجسام المراد وزنها ، ولهذا فالنتيجة واحدة فى كل مكان . بيد أن هذه النتيجة هى « الكتلة » لا « الوزن » . و « الوزن » المعيارى كتلته الواحدة فى كل

مكان ، ولكن ليس له نفس « الوزن » ، فهو فى الواقع وحدة للكتلة ، لا للوزن والكتلة — التى تكاد تكون لا متغيرة بالنسبة لجسم معين — تعد من أجل الأغراض النظرية — أهم كثيراً من الوزن الذى يتغير حسب الظروف . ويمكن أن ننظر إلى الكتلة — كبداية — على أنها « كمية المادة » quantity of matter وسنرى أن هذا الرأى ليس صحيحاً صحة تامة ، ولكنه يمكن أن يفيد بوصفه نقطة بداية للتهذيبات التالية .

وتعرف الكتلة — من أجل الأغراض النظرية — على أنها محددة بكمية القوة المطلوبة لإحداث عجلة معينة ، وكلما كان الجسم أكثر تكتلا ، كانت القوة المطلوبة لتغيير سرعته بمقدار معين فى زمن معين ، أكبر . ويحتاج الأمر إلى قاطرة أقوى لكى تجعل قطاراً طويلا يصل إلى سرعة عشرة أميال فى الساعة فى نهاية نصف الدقيقة الأولى ، مما يحتاجه قطار أقصر ليصل إلى نفس هذه السرعة . أو قد تكون لدينا ظروف القوة فيها واحدة بالنسبة لعدد من الأجسام المختلفة ، وفى هذه الحالة ، إذا كنا نستطيع أن نقيس العجلات المحدثة فيها ، فإننا نستطيع أن نتنبأ بنسب كتلها : فكلما كانت الكتلة أعظم ، كانت العجلة أصغر . ويمكن أن نأخذ لتصوير هذا المنهج ، مثلا هاماً فى ارتباطه بالنسبية . فالأجسام ذات النشاط الإشعاعى تطلق جزئيات بيتا (إلكترونات) بسرعات هائلة . ونستطيع أن نشاهد طريقها بأن نجعلها تسير خلال بخار الماء ، وأن تكون سحابة أثناء مسيرها . ونستطيع فى الوقت نفسه أن نخضعها لقوى كهربائية ومغناطيسية معروفة ، ونلاحظ مدى انحرافها عن الخط المستقيم بتأثير هذه القوى . وهذا يجعل من الممكن مقارنة كتلها . وقد وجد أنه كلما كان مسيرها أسرع ، كانت كتلها أكبر ، وفقا لقياس مشاهد ثابت ، ومن المعروف أيضا — على العكس — أن للإلكترونات جميعا بغض النظر عن تأثير الحركة — كتلة واحدة .

كان هذا كله معروفاً قبل اختراع نظرية النسبية ، بيد أنها أثبتت أن القصور التقليدى للكتلة ليس له ذلك التحدد التام الذى كان يعزى إليه من قبل . وكان من المعتاد النظر إلى الكتلة على أنها كمية المادة ، وكان من المفترض أنها لا متغيرة تماما . والآن ، وجد أن الكتلة نسبية إلى المشاهد كالطول والزمان ، وأنه من

الممكن تغيرها بوساطة الحركة بنفس النسبة تماماً . ومهما يكن من أمر ، فهذه مسألة يمكن علاجها ، إذ نستطيع أن نأخذ « الكتلة الصحيحة » أي الكتلة كما يقيسها مشاهد يشارك في حركة الجسم . وكان هذا من السهل استنباطه من الكتلة المقيسة بأخذ نفس النسبة كما هي الحالة في الأطوال والأزمنة .

بيد أن هناك حقيقة أعجب من ذلك ، وهي أننا بعد أن قمنا بهذا التصحيح ، لم نحصل بعد على الكمية التي تكون في كل وقت هي نفسها للجسم نفسه . وحين يمتص جسم ما طاقة ، بأن يزداد سخونة مثلا — فإن « كتلته الصحيحة » تزداد زيادة طفيفة . وهذه الزيادة طفيفة جداً ، ما دمنا نقيسها بقسمة زيادة الطاقة على مربع سرعة الضوء . ومن جهة أخرى ، حين يفقد جسم شيئاً من الطاقة ، فإنه يفقد شيئا من كتلته . ولعل أجدر الحالات بالذكر في هذا الصدد أن أربع ذرات من الإيدروجين يمكن أن تتحد لتكون ذرة واحدة من ذرات الهيليوم ، بيد أن ذرة الهيليوم تزن أقل من أربعة أضعاف كتلة ذرة أيدروجين واحدة . وهذه الظاهرة ذات أهمية عملية عظمى . ومن المعتقد أنها تحدث داخل النجوم ، وتزود بالطاقة التي نراها على هيئة ضوء النجوم ، والتي تقوم عليها الحياة الأرضية في حالة الشمس ، ويمكن أن تحدث أيضاً في المعامل الأرضية ، بتحرير هائل للطاقة على شكل ضوء وحرارة . وهذا يجعل من الممكن إنتاج القنابل الهيدروجينية — التي يمكن أن تكون غير محدودة الحجم والقوة المدمرة . أما القنابل الذرية العادية التي تعمل بتفكك اليورانيوم ، فلها حد طبيعي : فإذا جمع مقدار كبير من اليورانيوم في مكان واحد ، فهو قابل للانفجار من تلقاء نفسه دون انتظار للتفجير ، ومن ثم فإن قنابل اليورانيوم لا يمكن أن تصنع إلا بحيث لا يتجاوز حجمها حداً أقصى معينا . غير أن القنبلة الهيدروجينية يمكن أن تحتوي من الهيدروجين حسبما تشاء ، لأن الأيدروجين لا ينفجر من تلقاء نفسه . وحين يتم تفجير الهيدروجين بقنبلة يورانيوم تقليدية ، فإنه في هذه الحالة فحسب يتجمع لتكوين الهيليوم ، ولإطلاق الطاقة . وهذا لأن هذا التجمع لا يحدث إلا في درجة حرارة مرتفعة جدا .

وهناك ميزة أخرى : إن مخزون اليورانيوم في أرضنا محدود جداً . وقد

يخشى أن ينفد قبل إبادة الجنس البشرى، ولـكن، الآن ، بعدأن أمكن استخدام كميات الأيدروجين غير المحدودة عملياً ـــ فهناك سبب وجيه لاحتمال أن يقضى « الإنسان الحكيم » homo sapiens على نفسه ، لمصلحة الحيوانات الأقل منه ضراوة التى قد تبقى بعده .

غير أن الوقت قد حان للرجوع إلى موضوعات أقل من هذا مرحاً .

لدينا إذن نوعان من الكتلة ، لا يرضى أى منهما المثل الأعلى القديم ، فالكتلة ـــ كما يقيسها مشاهد فى حركة بالنسبة للجسم المذكور ـــ كمية نسبية ، وليس لها دلالة فزيائية ، بوصفها صفة للجسم . « والكتلة الصحيحة » صفة حقيقية للجسم ، ولا تتوقف على المشاهد ولكنها ـــ هى أيضاً ـــ ليست ثابتة ثباتاً تاماً . وهكذا تصبح فكرة الكتلة ـــ كما سنرى قريباً ـــ مستوعبة فى فكرة الطاقة ، فهى تمثل ـــ إذا شئنا الصدق ـــ الطاقة التى ينفقها الجسم داخلياً ، فى مضاد الطاقة التى يظهرها للعالم الخارجى .

ولقد كان بقاء الكتلة وبقاء كمية الحركة ، وبقاء الطاقة هى المبادئ الكبرى فى الميكانيكا التقليدية . فلنبحث الآن فى بقاء كمية الحركة .

كمية الحركة لجسم ما فى اتجاه معين هى سرعته فى هذا الاتجاه مضروبة فى كتلته . وهكذا يمكن أن يكون لجسم ثقيل يتحرك ببطء نفس كمية الحركة التى لجسم خفيف يتحرك بسرعة . وحين يتبادل عدد من الأجسام الفعل بأية طريقة ، بالاصطدام مثلا ، أو بالجاذبية المتبادلة ، وما دامت أية مؤثرات خارجية لم تتدخل ـــ فإن مجموع كمية الحركة للأجسام جميعاً فى أى اتجاه ، تبقى دون تغيير . وهذا القانون يظل صادقاً فى نظرية النسبية . فالكتلة تختلف بالنسبة للمشاهدين المختلفين ، ولكن السرعة تختلف أيضاً ، ويعمل كل من هذين الاختلافين على تحييد الآخر وينتهى الأمر بأن يظل المبدأ صادقاً .

وكمية الحركة لجسم ما مختلفة فى الاتجاهات المختلفة . والطريقة المألوفة لقياسها هى أن نأخذ السرعة فى اتجاه معين (وفقا لقياس المشاهد) ونضربها فى الكتلة (كما يقيسها المشاهد) . والآن فإن السرعة فى اتجاه معين هى المسافة التى يقطعها

الجسم فى ذلك الاتجاه فى وحدة زمنية . فلنفترض أننا أخذنا بدلا من ذلك المسافة المقطوعة فى ذلك الاتجاه أثناء حركة الجسم خلال وحدة « فاصل » . (فى الأحوال العادية ، لا يكون هذا سوى تغيير طفيف جدا ، لأن الفاصل ــ بالنسبة للسرعات الأقل كثيرا من سرعة الضوء ــ يساوى تقريبا انقضاء الزمن) . ولنفترض أننا بدلا من أن نأخذ الكتلة كما قام بقياسها المشاهد ، أخذنا الكتلة الصحيحة . هذان التغيران يزيدان من السرعة ويقللان الكتلة بنفس النسبة ، وهكذا تبقى كمية الحركة هى نفسها ، ولكن استبدلت الكميات التى تتغـــير وفقا للمشاهد بكميات ثابتة ومستقلة عن المشاهد ــ باستثناء المسافات التى يقطعها الجسم فى الاتجاه المعين .

وعند ما نستبدل الزمان بمتصل « المكان ــ زمان » نجد أن الكتلة المقيسة (فى مضاد الكتلة الحقيقية) عبارة عن كمية من نفس نوع كمية الحركة فى اتجاه معين ، ويمكن أن تسمى كمية الحركة فى الاتجاه الزمنى . ونحصل على الكمية المقيسة بضرب الكتلة اللامتغيرة فى « الزمن » المقطوع فى الانتقال خلال وحدة « الفاصل » ونحصل على كمية الحركة بضرب نفس هذه الكتلة اللامتغيرة فى « المسافة » المقطوعة (فى الاتجاه المعين) فى الانتقال خلال وحدة الفاصل ، ومن الطبيعى ــ من وجهة نظر متصل « الزمان ــ مكان » . أن ينتمى كل منهما إلى الآخر .

وعلى الرغم من أن الكتلة المقيسة لجسم ما تتوقف على الطريقة التى يتحرك بها المشاهد بالنسبة للجسم ، فإنها مع ذلك كمية هامة جداً . والمحافظة على الكتلة المقيسة هى كالمحافظة على الطاقة سواء بسواء . وقد يبدو هذا باعثاً على الدهشة ، ما دامت الكتلة والطاقة ــ تبدوان لأول وهلة ــ شيئين مختلفين تمام الاختلاف ، ولكن ظهر أن الطاقة هى نفسها الكتلة المقيسة . وشرح هذه المسألة ليس يسيراً ، ومع ذلك ، فسنقوم بالمحاولة .

فى الكلام الدارج ، لا تعنى « الكتلة » و « الطاقة » شيئاً واحداً على الإطلاق . ونحن نربط « الكتلة » بفكرة رجل بدين بطىء الحركة يجلس على مقعد ، بينما توحى لنا فكرة « الطاقة » برجل نحيف زاخر بالحيوية والنشاط . ويربط الكلام الدارج بين الكتلة والقصور الذاتى inertia غير أن نظرتنا إلى « القصور الذاتى »

مقصورة على جانب واحد : إنها تتضمن البطء فى بداية التحرك، ولكنها لاتتضمن البطء فى التوقف الذى تشمله الكلمة أيضاً . وكل هذه المصطلحات مستخدمة فى الكلام الدارج . ونحن الآن معنيون بالمعنى الفنى لكلمة « طاقة » .

أثيرت فى النصف الأخير من القرن التاسع عشر ضجة كبيرة حول « بقاء الطاقة » أو « بقاء المادة » على حد التعبير الذى كان يؤثره هربرت سبنسر . ولم يكن من اليسير التعبير عن هذا المبدأ بطريقة بسيطة ، بسبب الأشكال المختلفة للطاقة ، غير أن النقطة الجوهرية هى أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث ، وإن يكن من الممكن تحويلها من نوع إلى آخر وقد اكتسب هذا المبدأ مكانته نتيجة لاكتشاف چول Joul للمعادل الميكانيكى للحرارة mechanical equivalent of heat الذى أثبت أن هناك نسبة ثابتة بين الشغل المطلوب لإحداث مقدار معين من الحرارة والشغل المطلوب لرفع ثقل معين إلى ارتفاع معين : والواقع أن نفس نوع الشغل يمكن أن يستخدم لأى من الغرضين وفقا للميكانيكية (الآلية). وعند ما وجد أن الحرارة تتألف من حركة الجزئيات molecules رئى من الطبيعى أن تكون مماثلة لأشكال الطاقة الأخرى . وإذا توسعنا فى هذا القول ، أمكن بمعونة قدر معين من النظرية إرجاع أشكال الطاقة جميعاً إلى شكلين ، أطلق عليهما على التوالى : طاقة الحركة kinetic وطاقة الوضع potential .

وطاقة الحركة لجزىء ما هى نصف الكتلة مضروبة فى مربع السرعة . وطاقة الحركة لعدد من الجزيئات هى مجموع طاقات الحركة لكل جزىء على حدة .

أما طاقة الوضع فأصعب من ذلك تحديداً فهى تمثل أية حالة من حالات التوتر التى لا يمكن المحافظة عليها إلا باستخدام القوة ، ولنأخذ أسهل حالة : إذا رفع ثقل إلى ارتفاع ما وظل معلقاً ، فإنه يحتوى على طاقة وضع ، لأنه لو ترك لنفسه ، فسوف يسقط . فطاقة الوضع له تساوى طاقة الحركة التى سيكتسبها إذا سقط فى نفس المسافة التى رفع منها . وبالمثل ، حين يدور شهاب حول الشمس فى فلك شاذ جداً ، فإنه يتحرك بسرعة أكبر حين يكون قريباً إلى الشمس منه حين يكون بعيداً عنها ، بحيث تكون طاقة وضعه أعظم كثيراً منها

حين يكون بالقرب من الشمس . ومن ناحية أخرى ، تكون طاقة وضعه أكبر
ما تكون حين يكون بعيداً عن الشمس ، لأنه يكون هذه الحالة شبيها بالصخرة
التي رفعت إلى أعلى . ومجموع الطاقتين : طاقه الحركة ، وطاقة الوضع للشهاب
مجموع ثابت ، اللهم إلا إذا عانى من الاصطدامات أو فقد شيئاً من مادته . ونحن
نستطيع أن نحدد بدقة « التغيير » الذى يطرأ على طاقة الوضع فى الانتقال من
وضع إلى آخر ، بيد أن المقدار الكلى لها اعتباطى إلى حد ما ، مادمنا نستطيع
أن نحدد مستوى الصفر حيثما نشاء . فمثلا ، يمكن أن تؤخذ طاقة الوضع للحجر
على أنها طاقة الحركة التى يتطلبها فى سقوطه إلى سطح الأرض ، أو ما يتطلبها
فى سقوطه فى بئر إلى مركز الأرض ، أو أية مسافة أقل . فلا أهمية لما نأخذه ،
ما دمنا نتمسك بقرارنا . . فنحن معنيون بحساب المكسب والخسارة ، وهو
ما لا يتأثر بمقدار الرصيد الذى نبدأ به .

وتختلف طاقات الحركة والوضع لمجموعة من الأجسام بالنسبة للشاهدين
المختلفين . وفى الديناميكا القديمة (الكلاسيكية) كانت طاقة الحركة تختلف وفقاً
لحالة الحركة التى يكون عليها المشاهد ، ولكن بمقدار ثابت ، أما طاقة الوضع
فلم تكن تختلف على الإطلاق . وبالتالى فإن الطاقة الكلية كانت ثابتة — بالنسبة
لكل مشاهد — مفترضين دائماً أن المشاهدين المعنيين بالأمر يتحركون فى خطوط
مستقيمة وبسرعات منتظمة ، أو إن لم يكن كذلك ، فإنهم قادرون على إرجاع
حركاتهم لأجسام تتحرك على ذلك النحو . بيد أن المسألة ازدادت تعقيداً فى
الديناميكا النسبية ، فإن أفكار نيوتن عن طاقة الحركة وطاقة الوضع يمكن أن
تتكيف دون صعوبة كبيرة مع نظرية النسبية الخاصة . ولكننا لانستطيع أن
نكيف فكرة طاقة الوضع لنظرية النسبية العامة تكيفاً يعود علينا بالنفع ،
كما أننا لا نستطيع أن نعمم فكرة طاقة الحركة اللهم إلا فى حالة جسم واحد .
وعلى هذا ، فإن بقاء الطاقة — بالمعنى النيوتونى العادى — لا يمكن الأخذ به .
والسبب هو أن طاقتى الحركة والوضع لنسق من الأجسام أفكار طبيعية تشير
إلى مناطق ممتدة من متصل « المكان — زمان » . فالمجال المتسع جداً فى اختيار
الإحداثيات ، والطبيعة الجبلية لمتصل المكان — زمان (اللذان شرحا فى الفصل
الثانى) يجتمعان ليجعلا من المتعذر إدخال أفكار من هذا القبيل فى النظرية

العامة . هناك قانون لبقاء الطاقة فى النظرية العامة ، ولكنه ليس مفيداً فائدة قوانين بقاء الطاقة فى ميكانيكا نيوتن وفى النظرية الخاصة ، لأنه يعتمد على اختيار الإحداثيات بطريقة يصعب فهمها . ولقد رأينا أن الاستقلال فى اختيار الإحداثيات مبدأ هام فى نظرية النسبية العامة ، وقانون بقاء الطاقة مشتبه فيه لأنه يتعارض مع هذا المبدأ . وسواء أكان ذلك يعنى أن بقاء الطاقة أقل من حيث الأهمية الجوهرية ، مما كان يعتقد حينذاك ، أم أن قانونا مرضياً لبقاء الطاقة ما زال مخفياً فى التعقيدات الرياضية للنظرية فهذه مسألة ما زالت فى حاجة إلى الحل . وفى هذه الأثناء — ينبغى أن نقنع فى النظرية العامة بفكرة طاقة الحركة لجزىء واحد فحسب. وهذا هو كل ما نحتاج إليه فى المناقشة التالية. وينبغى أن نتذكر أن هذه الصعوبات المتعلقة ببقاء الطاقة لا تنشأ إلا فى النظرية العامة ، لا فى النظرية الخاصة . وحينما أمكن إهمال الجاذبية ، وأصبحت النظرية الخاصة قابلة للتطبيق ، فإنه من الممكن التمسك ببقاء الطاقة .

وليس ما نعنيه بكلمة « بقاء » فى التطبيق ، هو ما نعنيه تماماً فى النظرية . ففى النظرية نقول إن كمية باقية حين يكون مقدارها فى العالم هو نفسه فى وقت ما ، كما هو فى أى وقت آخر . ولكننا لا نستطيع — من الوجهة العملية — أن نمسح العالم بأسره ، ومن ثم فلا بد أن نعنى شيئاً آخر يمكن الإحاطة به ، ونحن نعنى ، أننا لو أخذنا أية منطقة معينة ، فإن تغير مقدار الكمية فى المنطقة ، معناه أن بعض هذه الكمية قد انتقل عبر حدود المنطقة . ولو لم تكن هناك حالات ميلاد ، وحالات وفاة ، لظل تعداد السكان ثابتاً ، وفى هذه الحالة لا يمكن أن يتغير تعداد السكان إلا بالهجرة من المنطقة أو إليها ، أى بالانتقال عبر الحدود . وقد لا نكون قادرين على القيام بتعداد دقيق للصين أو لأواسط أفريقيا ، ومن ثم قد لا نكون قادرين على التأكد من مجموع السكان الكلى فى العالم . ولكننا نستطيع أن نبرر أنفسنا حين نفترض أنه ثابت ، لو أن عدد السكان — حيثما كانت الإحصائيات ممكنة ، لم يتغير قط إلا بعبور الناس للحدود . والواقع طبعاً ، أن عدد السكان لا يبقى ثابتاً . وقد وضع فسيولوجى من معارفى أربعة فئران ذات مرة فى ترموس وبعد عدة ساعات حين ذهب ليخرجها ، وجدها أحد عشر فأراً . غير أن

الكتلة لا تخضع لمثل هذه التقلبات . ذلك أن كتلة الأحد عشر فأراً لم تكن فى نهاية الوقت أكبر من كتلة الفئران الأربعة فى بداية الأمر .

وهذا يعود بنا إلى المشكلة التى كنا نناقش الطاقة من أجلها . لقد ذكرنا أن الكتلة المقيسة والطاقة ينظر إليهما فى نظرية النسبية على أنهما شىء واحد ، وأخذنا على عاتقنا أن نبين لماذا كان ذلك . وقد حان الوقت الآن لنشرع فى هذا الشرح . بيد أن الأمر هنا — مثله فى نهاية الفصل السادس ، ويحسن بالقارىء الذى لا يلم بشىء من الرياضيات أن يتركه ، وأن يبدأ بالفقرة التالية .

فلنأخذ سرعة الضوء على أنها وحدة السرعة ؛ وهذه الطريقة مريحة دائماً فى نظرية النسبية ، ولكن « ك » هى الكتلة الصحيحة لجسيم ما ، « س » هى السرعة بالنسبة للشاهد ومن ثم فإن الكتلة المقيسة تكون :

$$\frac{ك}{\sqrt{١ - س^{٢}}}$$

بينما تكون طاقة حركته — وفقاً للصيغة المعهودة هى :

$$\frac{١}{٢} ك س^{٢}$$

ولا تحدث الطاقة — كما سبق أن رأينا — إلا فى حساب للمكسب والخسارة بحيث نستطيع أن نضيف إليها أية كمية ثابتة نريدها ، وعلى ذلك يمكن أن نأخذ الطاقة على أنها :

$$ك + \frac{١}{٢} ك س^{٢}$$

والآن ، إذا كانت س كسراً صغيراً من سرعة الضوء ، فإن $ك + \frac{١}{٢} ك س^{٢}$ تكاد تعادل تماماً $\frac{ك}{\sqrt{١ - س^{٢}}}$. وبالتالى ، فإنه بالنسبة للسرعات التى الأجسام الكبيرة ، فإن الطاقة والكتلة المقيسة تصيران غير متمايزتين داخل حدود الدقة الممكنة . والواقع أنه من الأفضل تعديل تعريفنا للطاقة ، ليكون

$\frac{ك}{\sqrt{١ - س^٢}}$ ، لأن هذه هى الكمية التى يتمسك بها القانون المماثل لقانون بقاء الطاقة . وحين تكون السرعة عظيمة جداً ، فإنها تعطى قياساً أفضل للطاقة مما تعطيه الصيغة التقليدية . ولهذا يجب أن ننظر إلى الصيغة القديمة على أنها تقريب تعطى له المعادلة الجديدة صورته المضبوطة . وبهذه الطريقة ، تصبح الطاقة والكتلة المقيسة شيئاً واحداً .

وأصل الآن إلى فكرة « الفعل » action التى هى أقل ألفة للجمهور من فكرة الطاقة ، ولكنها أصبحت أكثر أهمية فى الفزياء النسبية ، وفى نظرية الكم أيضاً . (الكم مقدار صغير من الفعل) . وكلمة « فعل » تستخدم للإشارة إلى الطاقة مضروبة فى الزمان . وهذا يعنى ، أنه إذا كانت هناك وحدة واحدة للطاقة فى نظام معين ، فسوف تقوم بوحدة من الفعل فى ثانية ، ومائة وحدة من الفعل فى مائة ثانية ، وهلم جرا . والنظام الذى توجد فيه مائة وحدة من الطاقة ، يؤدى مائة وحدة من الفعل فى ثانية و٠٠٠٠ر١٠ وحدة فى مائة ثانية ، وهكذا . الفعل إذن — بمعناه البسيط — هو مقياس ما تم فعلا ، ويزداد باستخدام مزيد من الطاقة ، وبالعمل زمناً أطول . ولما كانت الطاقة هى الكتلة المقيسة ، فيمكننا أيضاً أن نأخذ الفعل على أنه الكتلة المقيسة مضروبة فى الزمن . « وكثافة المادة . فى أية منطقة هى — فى الميكانيكا القديمة — عبارة عن الكتلة مقسومة على الحجم ، وهذا معناه أنك إذا عرفت الكثافة فى منطقة صغيرة ، فإنك تستطيع أن تكتشف المقدار الكلى للمادة بأن تضرب الكثافة فى حجم المنطقة الصغيرة . أما فى الميكانيكا النسبية ، فنحن نريد دائماً أن نستبدل المكان بمتصل المكان والزمان ، وعلى ذلك ينبغى ألا تؤخذ « منطقة » ما على أنها مجرد حجم ، بل على أنها حجم يبقى زمناً ما ، وبذلك تكون المنطقة الصغيرة بالمعنى الجديد — تحتوى — لا على كتلة صغيرة فحسب ، بل على كتلة صغيرة مضروبة فى زمن قصير ، أى مقدار صغير من « الفعل » . وهذا يفسر لنا ، لماذا يكون من المتوقع أن يكون الفعل ذا أهمية رئيسية فى الميكانيكا النسبية . وإنه لكذلك فى الحقيقة .

ويمكن أن تحل محل المصادرة القائلة بأن الجزىء الذى يتحرك فى حرية يتبع خطوط

جيوديسية geodesic افتراضاً معادلا عن « فعل » الجزىء . وهذا الافتراض يسمى « مبدأ أقل فعل » Principle of Least Action ،ويقرر هذا المبدأ أنه فى الانتقال من حالة إلى أخرى ، يختار الجسم طريقاً يتطلب فعلا أقل ما يتطلبه أى طريق يختلف اختلافاً طفيفاً ، وهذا قانون آخر عن الكسل الكونى ! ومبادىء «أقل فعل » ليست مقصورة على الأجسام المفردة ، فمن الممكن أن نضع افتراضاً مماثلا يؤدى إلى وصف متصل « المكان — زمان » بوصفه كلا ، كاملا بتلاله ووديانه . ومثل هذه المبادى التى تلعب دوراً رئيسياً فى نظرية الكم ، ونظرية النسبية على السواء ، هى أشمل وسيلة لتقرير الجزء الصورى الخالص من الميكانيكا .

الفصل الحادي عشر

الكون المتمدد

تناولنا حتى الآن تجارب وملاحظات يتعلق معظمها بالأرض والنظام الشمسي . وكان عرضاً أن وصلنا إلى مجالات بعيدة كمجالات النجوم . وفي هذا الفصل سنصل إلى أبعد من ذلك ، فسنرى ما تقوله النظرية النسبية عن الكون ككل .

ويجب أن ينظر إلى المشاهدات الفلكية التي سنناقشها على أنها نتائج علمية مقررة ومهما يكن من أمر ، فإن الشروح النظرية لهذه النتائج ذات طبيعة تأملية، وينبغي ألا نفترض أننا نتناول مسائل نظرية لها نفس الصلابة التي اتسمت بها المسائل التي تناولناها حتى الآن . وليس من شك في أنها في حاجة إلى تحسين . فالعلم لا يهدف إلى إرساء حقائق ثابتة وعقائد أبدية ، وإنما هدفه هو الاقتراب من الحقيقة بتقريبات متتابعة ، دون أن يدعي في أية مرحلة أنه قد وصل إلى الدقة النهائية الكاملة .

ومن الضروري أن نمهد بشروح أولية قليلة عن المظهر العام للكون . وقد عرف الآن الكثير عن توزيع المادة على نطاق واسع جداً . وشمسنا واحدة من النجوم في نظام يضم ١٠٠٫٠٠٠ مليون نجم ، ويسمى هذا النظام بالمجرة . وهذه المجرة على هيئة عجلة كاترين هائلة . بأذرع لولبية من النجوم خارجة عن جولق (محور العجلة) مركزي لامع . ومعالم هذه المجرة ليست حادة كل الحدة ، غير أن الجسم الرئيسي للنجوم يبلغ طوله ٣٠٫٠٠٠ سنة ضوئية ، وعشر هذا الرقم من حيث الكثافة (السنة الضوئية هي المسافة التي يقطعها الضوء في سنة ــ حوالى ستة مليون مليون ميل) وتقع الشمس في إحدى هذه الأذرع الحلزونية ، على بعد ٢٥٫٠٠٠ سنة ضوئية من مركز الجولق . والطريق اللبنية ، وهي مجموعة متألقة من النجوم ممتدة عبر السماء ، وترى بسهولة في الليالي الصافية ، هي الحد

الأقصى الذى يمكن أن يصل إليه نظرنا لبقية المجرة من هذا الوضع فى الذراع الحلزونى .

وتحتوى المجرة إلى جانب النجوم على كميـــة كبيرة من الغازات معظمها من الأيدروجين ، كما تحتوى على كمية من التراب . ومجموع كتلة الغاز والتراب تعادل ــ على الأرجح ــ مجموع كتلة النجوم إذا وضعت معاً . وهذا الركام من النجوم والغبار والغاز يدور ببطء حول الجولق . وتتفاوت سرعة الدوران حسب بعد المسافة عن الجولق ، وتستغرق الشمس ٢٢٥ مليون سنة لكى تدور مرة واحدة .

والمجرة ليست وحدها فى الكون بحال من الأحوال.فهى واحدة بين ملايين عديدة من النظم المماثلة المتناثرة خلال المنطقة التى تستطيع مناظيرنا الفلكية (التلسكوبات) كشفها. وهذه النظم تسمى أيضاً بالمجرات (وأحياناً تسمى بالسدم) وبعض هذه المجرات مسطحة، ذات أذرع لولبية كمجرتنا ،وبعضها الآخر مستديرة ككرة القدم ، أو بيضاوى ككرة الرجبى ، ومنها ما له شكل غير منتظم .

وتظهر المجرات ميلا إلى أن تتجمع فى جماعات،وهذه الجماعات تسمى «عناقيد» clusters وقد يحتوى العنقود الواحد على ألف مجرة أو ما يزيد على ذلك ، وكل منها نظام نجمى مترامى الأطراف كنظامنا . ومجرتنا تنتمى إلى عنقود من تلك العناقيد يسمى «المجموعة المحلية» يضم حوالى سبع عشرة مجرة أخرى (لانستطيع التأكد تماماً من عدد المجرات فيه لأن عدداً من الأعضاء المشتبه فيها صغير وخافت نسبياً) ولعل أشهر جارة لنا فى « المجموعة المحلية » local group هى مجرة أندروميدا العظيمة (أو المرأة المسلسلة) ، وتبعد عنا بحوالى ١٫٥٠٠٫٠٠٠ سنة ضوئية . وتظهر خافتة للعين المجردة .

وتبدى عناقيد النجوم على أنها أكبر وحدات طبيعية للمادة فى الكون . ولايبدو أن هناك ميلا ــ وإن لم يكن ذلك مؤكداً بعد ــ إلى مزيد من التجميع أى تكوين عناقيد للعناقيد ، ويبدو أن توزيع العناقيد الحالى متجانس إلى حد بعيد . فهناك من النجوم فى شطر من السماء ما يعادل النجوم فى شطر آخر ، كما

تبدو أنها موزعة توزيعاً متجانساً من حيث العمق ، وليست العناقيد مرتبة بانتظام طبعاً — وكأنها صفوف من النقاط ، ولكنها موزعة اعتباطاً، وكأنها قطرات من المطر على زجاج نافذة بعد أن بدأ المطر فى السقوط.وتوزيع العناقيد متجانس بنفس المعنى الذى نعنيه حين نقول إن توزيع قطرات المطر متجانس — فأنت لاتستطيع أن تقول إن عدد قطرات المطر على كل لوح من الزجاج هو نفسه، ولكن هذا العدد لن يختلف كثيراً فى لوح عنه فى اللوح التالى .

ولأن عناقيد المجرات هى أكبر وحدات طبيعية . ولأننا نستطيع أن نرى فعلا عددا كبيراً من هذه الوحدات ، فمن المعقول أن نفكر فى أن الجزء المرئى من خلال المناظير الفلكية الموجودة يمثل الكون ككل. ولن يكون من المعقول أن نفترض أن المنطقة المتجانسة تمتد إلى المدى البعيد الذى يمكن أن تراه المناظير الفلكية الآن (وهو حوالى ١٠٠٠ مليون سنة ضوئية) وأن التحسين التالى فى المشاهدة سيكتشف مناطق أبعد ذات طبيعة مختلفة تمام الاختلاف .وقد لايكون من المستحيل أن يكون الأمر على هذا النحو ، بيد أن هذا معناه أن المجموعة المحلية — أو فى مكان ما بالقرب منها — قد اختيرت بصفة خاصة على أنها مركز المنطقة المتجانسة ، بينما لا يوجد سبب عملى لافتراض أنها اختيرت بهذه الطريقة .

وهذه الفكرة القائلة بأن الكون متجانس على نطاق واسع ، وهى الفكرة التى اقترحت قبل أن تقوم عليها بينة فلكية مناسبة ، قد اكتسبت الآن وضع المسلمة الأساسية . ويطلق عليه عادة اسم « المبدأ الكونى » وهذا المبدأ ما هو إلا امتداد حقاً لأفكار « كوبرنيكس » .وما إن تتخلى عن الفكرة الأنانية القائلة بأن الأرض هى مركز الأشياء جميعاً ، فإننا نجد أنفسنا مدفوعين إلى إدراك أن الشمس التى هى نجم عادى — لاحق لها أكثر من الأرض فى أن يكون لها مكان خاص فى وصفنا للكون . وحين نجد أن مجرتنا والعنقود الذى تنتمى إليه هما أيضاً مجرد عينات نموذجية ، فينبغى أن يوضعا أيضاً منطقياً على مستوى واحد مع الأشياء المماثلة الأخرى . كما أنه لايوجد أى سبب تجريبى لافتراض أن قوانين الفزياء تتباين تبايناً منظماً من عنقود من المجرات إلى عنقود آخر .

ومن هذه الحجج ، نستنتج أن الكون متجانس على نطاق واسع، أو بعبارة أخرى ، أنه يتفق مع المبدأ الكونى .

ويمكن أن توضح نتائج هذا المبدأ بطريقة مختلفة اختلافاً طفيفاً . فلنفترض أنك وضعت فى صندوق بلا نوافذ،وأنك نقلت إلى جزء بعيد من الكون . وحين تطلق من الصندوق ، فلن ترى — بالطبع — التوزيع الخاص للنجوم والمجرات المرئية من الأرض — ذلك أن التفاصيل الجغرافية لبيئتك الجديدة ستكون مختلفة . ولكن — وفقاً للمبدأ الكونى ، فإن المظهر الإجمالى للكون سيكون هو نفسه ، ولن تستطيع بمعزل عن التفاصيل أن تبين الجزء الذى كنت فيه من الكون .

وثمةظاهرة بارزة جدا كان من الممكن أن تؤدى بنا إلىافتراض أن لعنقودنا المحلى من المجرات وضعا خاصا فى الكون — على كل حال . وهذا هو ما يسمى بإزاحة الخط الأحمر فى طيف المجرات البعيدة . وبسبب هذه الظاهرة — كما سنرى فيما بعد — يقال إن الكون آخذ فى التمدد .

ويعنينا هنا تأثير شرحناه فى الفصل التاسع ، وإن نكن معنيين به فى ذلك الفصل عناية مباشرة . وأنت تتذكر التشبيه الذى أوردناه هناك عن الصوت: إذا كان هناك قطار يتحرك نحوك ، فإن شدة صفارته تكون أعلى مما لو أنه كان ثابتاً لا يتحرك ، بينما إذا كان يتحرك مبتعداً عنك فإن شدة الصفارة تكون أشد انخفاضاً ، وهذه التأثيرات مشابهة أشد المشابهة فى حالة الضوء ، فلو كان مصدر الضوء يتحرك نحوك ، فإن طيف الضوء كله ينتقل نحو البنفسجى ، وإذا كان المصدر يتحرك مبتعداً عنك ، فإن الطيف كله ينتقل صوب الأحمر . هذه الانتقالات للطيف تناظر التغيرات التى تطرأ على شدة الصوت فى صفارة القطار ، ويتوقف مقدار الانتقال على سرعة مصدر الضوء بالنسبة إليك . (ولا علاقة لهذا بسرعة الضوء نفسها ، التى تعد مستقلة عن حركة المصدر — كما سبق أن رأينا) ، وهذه الإزاحة للطيف تزودنا بوسيلة لتحديد سرعات النجوم والمجرات بمقارنة أطياف الضوء التى تبعث بها بالأطياف المماثلة التى نحدثها فى معاملنا على الأرض. وتبلغ سرعات المجرات فى «المجموعة المحلية» التى نقيسها بهذه الطريقة ، حوالي ٣٠٠ ميل فى الثانية . وهذه سرعة سريعة جداً بالنسبة لمعاييرنا اليومية .

ولكن نظراً للمسافات الشاسعة الممتدة بين المجرات ، فإن أي تغيير ملحوظ في أوضاعها يستغرق ملايين السنين .

وبعض المجرات في المجموعة المحلية ، يتحرك نحونا ، وبعضها يتحرك بعيداً عنا، وليس في هذا القول شيء بارز عن هذه الحركة التي يمكن أن تقارن بحركة سرب من النحل . فالنحل يتحرك بعضه بالنسبه لبعضه الآخر ، بيد أن السرب بوصفه كلا يظل متحركاً معاً. ويختلف الموقف إلى حد ما عندما نفحص عناقيد أخرى غير عنقودنا . فهنا أيضاً حركات داخلية في كل عنقود ، غير أن كل العناقيد الأخرى يبدو أنها تتحرك «مبتعدة» عن عنقودنا ، وكلما أمعنت في الابتعاد ، بدت أسرع في الحركة . وهذه الظاهرة العجيبة هي التي توحي بأن الكون آخذ في التمدد .

وقد نميل — نظراً لأن كافة العناقيد الأخرى تبدو متحركة بعيداً عن عنقودنا — إلى التفكير في أن المجموعة المحلية قائمة في مركز الكون الآخذ في التمدد وهذا خطأ ، لأنه يتجاهل الطبيعة النسبية للحركة التي أشرنا إليها مراراً وتكراراً في هذا الكتاب. ولننظر مرة أخرى في التشبيه الخاص بأسراب النحل . فلنفترض أنها أسراب مدربة تدريباً حسناً ، وأنها تحوم فوق الأرض بحيث تكون المسافة بين كل سرب والسرب الآخر ياردات ، في خط يجري من الغرب إلى الشرق ، ولنفترض بعد ذلك أن سرباً من هذه الأسراب يبقى ساكناً بالنسبة للأرض ، على حين أن السرب الذي يبتعد عنه عشر ياردات إلى الشرق ، يتحرك صوب الشرق بسرعة ياردة كل دقيقة ، والسرب الذي يبتعد عنه عشرين ياردة إلى الشرق ، يتحرك صوب الشرق بسرعة ياردتين في الدقيقة ، وهكذا دواليك ، بينما تتحرك الأسراب الموجودة في غرب السرب الثابت — تتحرك إلى الغرب بسرعات مماثلة . وحينئذ سيبدو لأية نحلة في أي من هذه الأسراب ، سواء أكانت ثابتة أم متحركة ، أن الأسراب الأخرى جميعاً تتحرك مبتعدة عن سربها بسرعات تتناسب مع مسافاتها . فإذا لم تكن الأرض ميسرة بوصفها معياراً للسكون ، فلن يكون ثمة سبب يدفع إلى التفكير في أننا قد اخترنا سرباً واحداً من هذه الأسراب بطريقة خاصة .

وسلوك عناقيد المجرات مشابه لذلك تماماً . وليس من شك في أنها موزعة

توزيعاً غير منتظم فى جميع الاتجاهات بدلا من أن تكون مصفوفة فى خط واحد كأسرابنا من النحل المدربة تدريباً حسناً ، ولكن يبدو للشاهد الموجود فى أى عنقود — كما هى الحال فى الأسراب — أن العناقيد الأخرى جميعاً تتحرك مبتعدة عنه . ولما لم يكن هناك معيار مطلق للسكون فى الكون ، فإن مظهر التمدد واحد بالنسبة للعناقيد جميعاً .

وأقرب عنقود — وهو على بعد حوالى ٢٥ مليون سنة ضوئية ، ويحتوى على ٥٠٠ مجرة أو أكثر — له إزاحة نحو الخط الأحمر تقابل سرعة ارتداد عن الأرض مقدارها ٧٥٠ ميلا فى الثانية . وأبعد عنقود أمكن بحثه ، له إزاحة نحو الخط الأحمر تبلغ ضعف العنقود السابق مائة مرة ، وتقابل سرعة ارتداد مقدارها ٢/٥ سرعة الضوء .

فلنبحث الآن ، كيف يمكن أن تتلاءم هذه المعلومات عن الكون مع نظرية النسبية العامة . لقد رأينا أن التأثيرات الجاذبة للشمس يمكن أن توصف بما يوصف به تل فى منتصف « الزمان — مكان » . ويمكن تشبيه المجرة أو العنقود على هذا النحو نفسه . ولكن بتل أكبر كثيراً ، وذلك نظرا لكتلتها (أو كتلته) العظيمة جدا (تبلغ كتلة العنقود النموذجى حوالى مليون مليون مرة ضعف كتلة الشمس) . ولو حاولنا أن نحشر فى هذا الوصف تفاصيل توزيع النجوم فى كل مجرة ، وتوزيع المجرات فى كل عنقود ، لكان لابد من أن يكون تلنا معقداً له قمم ووديان كثيرة . ولحاولنا عندئذ أن نصف الكون كله على نحو يمكن تشبيهه بمتصل « المكان — زمان » وفيه تلال متناثرة تمثل العناقيد . ومثل هذا الوصف معقد غاية التعقيد من الناحية الرياضية لأنه سوف يتضمن تفاصيل جغرافية عديدة ليست جوهرية فى وصف المظهر الإجمالى للكون . ولتبسيط هذا الوصف نشيد نماذج تحتفظ بالسمات الجوهرية . وتتخلى عن التفاصيل الجغرافية . والسمات التى نحتفظ بها هى التجانس على نطاق واسع ، والامتداد . والتفاصيل التى نتخلى عنها هى المواقع المحددة ، والأحجام ، وتكوينات العناقيد الفردية .

وهكذا نشيد نموذجا لمتصلات « المكان — زمان » لتمثل الكون ، مفترضين أنه متجانس على وجه الدقة ، لا على وجه التقريب . وفى هذه النماذج المبسطة

تتخيل المادة وقد أتيحت لها نعومة تجعلها توزع توزيعا متصلا بدلا من أن تتجمع فى عناقيد تفصل بينها مسافات شاسعة من الفضاء .

وكما يمكن أن يوصف تجمع المادة فى عنقود بقولنا إن هناك تلا كبيراً فى متصل «الزمان — مكان» حيث نشاهد العنقود أو بقولنا إن متصل الزمان — مكان قد انحنى بالقرب من العنقود ، فكذلك يمكن وصف التوزيع المتجانس للمادة فى نموذج ناعم للكون بقولنا إن متصل «المكان — زمان» ينحنى انحناء متجانسا، وتأثير تنعيم المادة التى تؤلف العناقيد المختلفة يعمل على تنعيم أو تسوية تقويس (انحناء) المناظر لإنتاج تقويس إجمالى طفيف . وهذا التقويس الإجمالى للكون يشبه إلى حد ما تقويس كرة فى المكان العادى ، ولكننا لن نمعن فى تشبيه التقويس بتلال متصل «المكان — زمان» أبعد من ذلك ، بمقارنة التقويس الإجمالى لمتصل «المكان — زمان» بتقويس الأرض ، لأن هذا الإمعان فى التشبيه من السهل أن يصير مضللا .

ويسمح لنا قانون أينشتين للجاذبية ، بالإضافة إلى افتراض التنعيم — أى الافتراض القائل بالتجانس الدقيق — إلى إنشاء تنوع من نماذج الكون ، يتخذ فيها التقويس الإجمالى تنوعاً من الأشكال المختلفة . والتأثير الرئيسى فى هذا التقويس الإجمالى هو أنه يقتضى فى بعض النماذج ، أن يظهر الكون وكأنه يتمدد. وهنا يوجد قدر معين من حرية الاختيار . وذلك بسبب حرية الاختيار لنظم الإحداثيات المتاحة لنا فى نظرية النسبية فقد نختار الإحداثيات بحيث تكون المادة المنعمة فى حالة سكون ، أو قد نختارها بحيث تكون المادة آخذة فى التمدد، ويبدو التقويس أقل انحناء . ونوع الإحداثيات الذى نستخدمه مسألة ذوق ، ولا يؤثر على النتيجة النهائية ، وهى التنبؤ بأنه وفقاً لهذه النماذج للكون ، فإن طيف الأشياء البعيدة سيلاحظ أنه ينتقل صوب الأحمر . وقد نعزو هذه الإزاحة نحو الخط الأحمر إلى التمدد ، أو إلى التقويس ، أو إلى كل منهما جزئياً . ولأن التمدد فكرة أسهل فى التفكير من تقويس «متصل الزمان — مكان» ، فمن المريح عادة أن نتحدث عن الكون المتمدد بدلا من الكون المنحنى ، بيد أن هذين — من ناحية المصطلح الرياضى — شيء واحد . وقد كان من الأسهل فى حالة الإزاحة نحو الخط الأحمر التى تنبأنا بها فى الخطوط الطيفية للشمس ، وهو التأثير

الذى تناولناه فى الفصل التاسع ــ كان من الأسهل التفكير على النحو الآخر ، وإرجاع الإزاحة نحو الخط الأحمر إلى التقويس .

وتتفق نماذج الأكوان التى كنا بصدد الحديث عنها ــ قليلا أو كثيرا مع الملاحظات الخاصة بالصفات الإجمالية لكوننا . فهناك أكوان أخرى ، تتسق على السواء مع قانون أينشتين وافتراض التجانس ، وفيها « إزاحة ــ زرقاء » تتجاوب مع تقلص للكون ، بدلا من الإزاحة الحمراء ، وليس فى وجود مثل هذه النماذج ما يدعو إلى رفض نظرية أينشتين ، وإنما تقضى بأن النظرية ليست كاملة ، وبأنه من المطلوب افتراض إضافى يستبعد النماذج غير المطلوبة . ولقد افترضت افتراضات شتى ، ولكن لم يوجد حتى الآن افتراض مرض تماماً .

ولنفحص نتائج التمدد مزيدا من الفحص ، متذكرين دائماً أن ما نقوله يمكن أن يعاد قوله فى حدود تقويس « الزمان ــ مكان » إذا لزم الأمر . وأوضح نتيجة هى أنه لو كان الكون آخذاً فى التخلخل ــ أى لو أن عناقيد المجرات يبتعد بعضها عن البعض الآخر ، فلا بد أنها كانت فى الماضى أقرب إلى بعضها البعض منها الآن . فلنفترض أننا التقطنا شريطاً سينمائياً للكون المتمدد خلال فترة تمتد ملايين عديدة من السنين ، بحيث نسجل تاريخ التمدد كله . ولو أننا عرضنا هذا الشريط عائداً إلى الوراء ، لأظهر لنا تاريخ الكون مقلوباً . وبدلا من أن تبدو عناقيد المجرات جميعاً مبتعدة الواحد عن الآخر ، فسيبدو أنها تتحرك الواحد صوب الآخر . . . كلما تراجع الشريط القهقرى ، اقتربت أكثر فأكثر حتى لا يعود بينها أية فجوات على الإطلاق وإذا واصلنا العودة إلى الوراء ، فقد نفترض أنه حتى الأمكنة الموجودة بين النجوم ستختفى ، بعد أن يملأ الفضاء المتاح كله بغاز ساخن مركز تركيزاً شديداً تخرج منه النجوم .وينبغى أن يسبق هذا الكلام كله عبارة « افترضنا »لأن الملاحظات الفلكية لا تبين لنا إن كانت هذه الحالة المكثفة تكثيفاً شديدا قد وجدت أو لم توجد على الإطلاق . والنماذج النظرية هى التى تمدنا بالأسباب الوحيدة التى تدعونا إلى افتراض وجودها .

وحتى النماذج النظرية ،لا يمكن الوثوق بها فى بيان ماحدث فى الماضى البعيد،

لأنه لو وجدت حالة الكثافة الشديدة فإن ماهو معروف عن الصفات الكمية للمادة يوحى بأنه كانت للصفات الكمية فى مثل هذه الحالة تأثيرات هامة . وقد رأينا أن نظرية أينشتين عاجزة عن وصف مثـــل هذه التأثيرات ، ولهذا لا توجد فى واقع الأمر ـــ معلومات موثوق بها على الإطلاق عن حالة الكثافة الشديدة . وبالإضافة إلى ذلك ، فإن إمكانية التأثيرات الكمية تقتضى أنه ما من شىء قد حدث قبل حالة الكثافة الشديدة يمكن أن يؤثر على السلوك التالى للكون . وهذه كلها أقوال نظرية ، ونستطيع أن نستنتج منها فحسب أن الكون قد خرج ـــ فى الواقع ـــ من حالة شديدة الكثافة ، وأن هذه الحالة تمثل الأزمنة الأولى التى ليس من المحتمل أن تحيط بها أية معلومات علمية . وما زال السؤال عما إذا كانت هذه الحالة قد حدثت فعلا أو لم تحدث ، موضع المناقشة ، فالمعلومات الفلكية المتاحة لنا ليست من الدقة الكافية للإجابة على هذا السؤال. ويميل أولئك الأشخاص الذين يعتقدون فى حدوث هذه الحالة ـــ إلى الإشارة إليها بوصفها « بداية الكون » أو « الزمان الذى خلق فيه الكون » أو شيئاً من هذا القبيل . وهذه العبارة لا تعنى أكثر من عبارة « الزمان الأول الذى ليس من المحتمل أن تحيط به أية معلومات علمية » . ويستحسن تجنب مثل هذه العبارات ، لأنها تحمل فى طياتها تضمينات ميتافيزيقية غير مرغوب فيها .

وهناك نماذج أخرى للكون ، تتسق مع المعلومات المتاحة لنا ، ومع قانون أينشتين للجاذبية ، وفى هذه النماذج لا تحدث حالة الكثافة الشديدة على الإطلاق. وأشهر هذه النماذج مايعرف « بنموذج الحالة المتزنة » . فلقد رأينا أنك لا تستطيع ـــ وفقاً للمبدأ الكونى ـــ أن تحدد مكانك فى الكون . غير أن اثنين من الفلكيين على كوكبين فى مجرتين مختلفتين يمكن أن يحددا « متى » يكونان ـــ فكل منهما سيلاحظ ـــ مثلا ـــ أن الكون آخذ فى النحافة أثناء تمدده ، كما يمكن أن يتفقا على الأزمنة التى يشاهدان فيها أنه قد نحف إلى أى مدى معين . ومهما يكن من أمر ـــ فإنك لا تستطيع فى نموذج الحالة المتزنة أن تحدد « متى » تكون تماماً ، كما لا تستطيع أن تحدد « أين » أنت . وهذا معناه أنه من المفترض فى نموذج الحالة المتزنة أن الكون يتبدى بمظهر إجمالى واحد ـــ لا بالنسبة

للفلكيين الموجودين فى أمكنة مختلفة فحسب بل بالنسبة للفلكيين الموجودين فى نفس المكان أو فى أمكنة مختلفة أو فى أوقات مختلفة . والتقسيم إلى مكان وزمان، الذى يبدو أنه يحدث هنا ، لا يتعارض مع النسبية ، ولا ينطبق إلا على الفلكيين الذين يتحركون مع عناقيد المجرات . والفلكى الذى يتحرك بسرعة مختلفة اختلافاً جوهرياً سيقوم بوصف أشد تعقيداً للكون . ونحن نفضل بالطبع النظر إلى هؤلاء الذين يقومون بأوصاف أبسط .

ولكى لا يتغير المظهر الإجمالى للكون بتغير الزمان ، وعلى الرغم من التمدد ، فمن الضرورى — ضرورة جلية — أنه فى أثناء تخلخل عناقيد المجرات لابد من أن تظهر عناقيد جديدة لتملأ الفجوات . فمن أين تأتى هذه العناقيد الجديدة ؟ تقول نظرية الحالة المتزنة أنه لابد من أن تظهر المادة فى الفضاء الممتد بين المجرات بمعدل هو المعدل الضرورى لإلغاء التخلخل الناجم عن التمدد . وقد يفترض مبدئياً أن هذه المادة على هيئة غاز الإيدروجين ، الذى يتشكل فيما بعد على هيئة نجوم ومجرات وعناقيد . والمعدل الذى يفترض أن يظهر به الإيدروجين نسبة ضئيلة جداً — ذرة واحدة فى فضاء بحجم كاتدرائية القديس بولس كل ألف سنة — فهى صغيرة إلى درجة تستبعدها معها المشاهدات المباشرة ، ولكنها كبيرة بما يكفى للتعويض عن التخلخل الناجم عن التوسع . والعملية التى يظهر بها الإيدروجين تسمى فى أغلب الأحيان باسم « الخلق المستمر » ، بيد أن هذه عبارة أخرى تحمل نغمات ميتافيزيقية ومن الأفضل ألا نستخدمها . وقد يبدو للوهلة الأولى أن هذه العملية مناقضة لقوانين بقاء الطاقة التى تؤلف شطراً من نظرية أينشتين . وحين نضع فى اعتبارنا التقويس الإجمالى للكون وضعاً تاماً ، فإن الأمر ينتهى إلى أن تكون العملية المقترحة متسقة تمام الاتساق مع نظرية النسبية . ولا يمكن أن يكون المعدل الذى تظهر به الذرات الجديدة — طبعا — أى شىء على الاطلاق ، بل يجب أن تظهر الذرات الجديدة بمعدل هو المعدل المطلوب تماماً للتمدد .

وهكذا توجد نماذج كثيرة للكون قائمة على نظرية أينشتين ، ومتسقة مع

المعلومات الفلكية المتاحة لنا . ولكل نموذج من هذه النماذج عيوبه ، ولعل أظهر هذه العيوب هو أنها تعطى صورة مهذبة لا تحسب حساباً لحجم المجرات والعناقيد وتركيبها . ويتوقف إنشاء نماذج أكثر تفصيلا على حل بعض الصعوبات الرياضية الخطيرة ، وإلى أن تتحسن معلوماتنا الفلكية فسوف لا نستطيع أن نختار اختياراً حاسماً بين هذه النماذج المختلفة .

الفصل الثاني عشر

مواضعات وقوانين طبيعية

من أصعب المسائل فى كل نزاع أن نميز الخلافات على الألفاظ من الخلافات على الوقائع . وقد كان ينبغى ألا يكون هذا التمييز صعباً ، ولكنه صعب فى التطبيق . ويصدق هذا القول على الفزياء صدقه على الموضوعات الأخرى . فقد ثارت فى القرن السابع عشر مناقشة رهيبة عن ماهية « القوة » ، وهى مناقشة — يبدو من الجلى لنا الآن — أنها كانت تدور عن الكيفية التى يجب أن تعرف بها كلمة « قوة » ، بيد أنه كان من المعتقد حينذاك ، أن الأمر يزيد على ذلك كثيراً . ومن أغراض منهج الكميات الممتدة المستخدم فى رياضيات النسبية ، الاستغناء عما هو لفظى (بالمعنى الواسع لهذه الكلمة) فى القوانين الفزيائية . ومن الواضح — بالطبع — أن ما يعتمد على اختيار الإحداثيات « لفظى » بالمعنى المذكور ، والملاح الذى يغرس مجاديفه فى قاع النهر يسير فى الزورق ، ولكنه يحتفظ بوضع ثابت بالنسبة لحوض النهر ، ما لم يلتقط مجدافه . وقد يجادل الأقزام جدلا لا نهاية له عما إذا كان سائراً أو واقفاً فى مكانه ، وسيكون الجدل دائراً حول ألفاظ ، لا حول وقائع . فلو أننا اخترنا إحداثيات ثابتة بالنسبة للقارب ، يكون سائراً . ونحن نريد أن نعبر عن القوانين الفزيائية بطريقة يكون من الواضح فيها حين نعبر عن نفس القانون بالإشارة إلى نظامين مختلفين للإحداثيات ، وذلك حتى لا نضل ، مفترضين أن لدينا قوانين مختلفة ، فى الوقت الذى لا يكون لدينا غير قانون واحد مصاغ فى ألفاظ مختلفة ، ويتم هذا بمنهج الكميات الممتدة . وبعض القوانين التى تبدو مستحسنة فى لغة ، تتعذر ترجمتها إلى لغة أخرى . وهذه مستحيلة بوصفها قوانين للطبيعة . فالقوانين التى يمكن ترجمتها إلى « أية » لغة إحداثيات تتميز بسمات معينة . وهذه معونة جوهرية فى البحث عن قوانين الطبيعة التى يمكن أن تقبلها نظرية النسبية بوصفها قوانين ممكنة . ومن هذه القوانين

الممكنة، نختار أبسطها ، وهو القانون الذى يتنبأ بالحركة الفعلية للأجسام تنبؤاً صحيحاً ، ويمتزج المنطق بالخبرة بنسبة متساوية فى الحصول على هذا التعبير .

بيد أن مشكلة الوصول إلى القوانين الحقيقية عن الطبيعة لا يحل بمنهج الكميات الممتدة وحده ، فلابد أن يضاف إليه قدر معين من التفكير المتأنى . وقد أنجز العلماء بعض هذا التفكير — وخاصة إدنجتون — وما زال باقياً الكثير .

ولنأخذ مثلا بسيطاً : فلنفترض — كما يذهب إلى ذلك افتراض الانكماش الذى وضعه فتزجيرالد — أن الأطوال فى اتجاه أقصر منها فى اتجاه آخر . ولنفترض أن مسطرة تشير إلى الشمال هى نصف نفس المسطرة مشيرة إلى الشرق ، وأن هذا ينطبق سواء بسواء على الأجسام الأخرى جميعاً . هل يكون لهذا الافتراض أى معنى ؟ ولو أن لديك عصا للصيد طولها خمس عشرة قدما حين تشير إلى الغرب، ثم حولتها إلى الشمال، إن طولها لا يزال خمس عشرة قدماً، لأن مسطرتك تكون قد انكمشت هى الأخرى ، ولن تبدو أقصر بحال من الأحوال ، لأن عينك قد تأثرت بنفس الطريقة . وإذا استطعت أن تفطن إلى التغيير ، فلن يكون ذلك بالقياس العادى . بل لابد أن يكون ذلك بمنهج يشبه تجربة ميكلسون — مورلى ، التى استخدمت فيها سرعة الضوء لقياس الأطوال . ويبقى عليك أن تقرر ما إذا كان من الأبسط أن تفترض تغيراً فى الطول أم تغيراً فى سرعة الضوء . والواقع التجريبى هو أن الضوء يستغرق وقتاً أطول ليقطع ما تبينه مسطرتك على أنه مسافة معينة فى اتجاه واحد ، منه فى اتجاه آخر — أو ، كما هى الحال فى تجربة ميكلسون — مورلى — أنه ينبغى أن يستغرق وقتاً أطول ، ولكنه لا يفعل ذلك . وتستطيع أن تكيف مقاييسك مع مثل هذه الحقيقة بطرق شتى ، وأية طريقة اخترتها ، سيكون ثمة عنصر اصطلاحى أو اتفاقى ، وهذا العنصر يبقى فى القوانين التى تصل إليها بعد أن تكون قد اتخذت قرارك فيما يتعلق بالمقاييس ، وهو يتخذ فى كثير من الأحيان صوراً خفية ، مراوغة . والواقع أن حذف عنصر الاصطلاح هذا ، صعب صعوبة غير مألوفة ، وكلما توغلنا فى دراسة الموضوع ، بدت لنا الصعوبة أعظم .

وهناك مثل أكثر من ذلك أهمية هو مسألة حجم الإلكترون . فنحن نجد

بالتجربة أن الإلكترونات جميعاً لها نفس الحجم . ولكن ، إلى أى مدى تكون هذه واقعة حقيقية تؤكدها التجربة،وإلى أى مدى تكون نتيجة لمواصفاتنا فى القياس؟ ولدينا هنا مقارنتان مختلفتان نعقدهما : (١) بالنسبة لإلكترون واحد فى أزمنة مختلفة ، (٢) بالنسبة لإلكترون فى نفس الزمن . ثم نستطيع أن نصل إلى مقارنة إلكترونين فى أزمنة مختلفة بأن نجمع بين (١) ، (٢) . وقد نستبعد أى افتراض يؤثر على الإلكترونات جميعاً على السواء ، فمن العبث مثلا أن نفترض أن الإلكترونات فى منطقة واحدة من متصل « المكان — زمان » تكون أكبر كلها منها فى منطقة أخرى . فإن مثل هذا التغير يؤثر على أدوات القياس تأثيره على الأشياء المقيسة ، ومن ثم لن يحدث أية ظاهرة قابلة للاكتشاف . وهذا يعادل قولنا إنه لا تغيير هناك على الإطلاق . أما واقعة أن لإلكترونين نفس الكتلة — مثلا — لا يمكن أن ينظر إليها على أنها إتفاقية صرفة.فإذا أتيحت لنا الدقة والضبط الكافيان ، فإنه يمكن أن نقارن تأثير إلكترونين مختلفين على إلكترون ثالث . فإذا تساويا فى مثل هذه الظروف ،كنا فى وضع يسمح لنا باستنباط المساواة ، بمعنى لا يكون اتفاقياً صرفاً .

ويصف إدنجتون هذه العملية فى الأجزاء المتقدمة من نظرية النسبية بأنها « بناء العالم » . والبناء الذى سيشيد هو العالم الفزيائى،كما نعرفه ، والمهندس المعمارى الاقتصادى يحاول أن يشيده بأصغر كمية ممكنة من المواد . فهذه مسألة تتعلق بالمنطق والرياضيات . وكلما كانت مهارتنا فى هذين الموضوعين أعظم ، استطعنا أن نبنى بناء حقيقياً ، ولم نقنع بمجرد أكوام من الصخور . ولكن ، قبل أن نستخدم فى بنائنا الأحجار التى تزودنا بها الطبيعة ، علينا أن ننحتها وفقاً للأشكال الصحيحة . هذا كله جزء من عملية البناء . ولكى يكون هذا ممكناً ، فينبغى أن يكون للمادة الخام « شىء » من التكوين (يمكن أن نتصوره شبيها بالحبة فى الخشب) ولكن أى تكوين يمكن أن ينفع ؟ وبتهذيباتنا الرياضية المتعاقبة نشذب مطالبنا الأصلية حتى تصبح شيئاً ضئيلا جداً — فإذا أتيح لنا هذا الحد الأدنى الضرورى من التكوين فى المادة الخام ، فإننا نجد أننا نستطيع أن نشيد منه تعبيراً رياضياً يتصف بالصفات التى نحتاج إليها فى وصف العالم الذى نتصوره — وعلى الأخص —

صفات البقاء التى تتميز بها كمية الحركة والطاقة (أو الكتلة) . ومادتنا الخام تتألف من الحوادث فحسب ، ولكن حين نجد أننا نستطيع أن نبنى منها شيئاً — يبدو — عند ما يقاس — أنه لا يفنى ولا يستحدث ، فليس غريباً أن يفضى بنا ذلك إلى الاعتقاد فى «الأجسام» وما هذه إلا مجرد تركيبات رياضية من الحوادث ولكن نظراً لدوامها ، فإنها هامة من الوجهة العملية ، وحواسنا (التى تطورت على سبيل الافتراض — نتيجة للاحتياجات البيولوجية) متكيفة لمشاهدة هذه الأحداث ، أكثر من تكيفها مع متصل الحوادث الغفل الذى يعد أكثر أساسية من الناحية النظرية . ومن الغريب — من وجهة النظر هذه — أن ما اكتشفه العلم الفزيائى من العالم الحقيقى ضئيل جداً : فمعارفنا محدودة ، لا بالعنصر الاتفاقى فحسب ، بل بانتقائية جهازنا الإدراكى أيضاً .

ومن الممكن — على الأخص — خلق ظروف التماثل خلقاً تاماً بوساطة المواضعات فيما يتعلق بالقياس ، وليس هناك ما يدعو إلى افتراض أنها تمثل أية خاصية للعالم الحقيقى . ويمكن النظر إلى قانون الجاذبية نفسه — على حد قول إدنجتون — على أنه يعبر عن مواضعات القياس فيقول : « إن مواضعات القياس تدخل التماثل فى كافة الاتجاهات[1] isotropy والتجانس فى المكان المقيس الذى ليس له مقابل فى «علاقة — التكوين Relation-structure التى تم مسحها . وهذا التماثل فى كافة الاتجاهات ، وهذا التجانس هما تماماً ما يعبر عنهما قانون أينشتين للجاذبية[2] .

وحدود المعرفة التى تفرضها انتقائية جهازنا الإدراكى يمكن تصويرها بعدم « فناء الطاقة» . وقد تم اكتشاف ذلك تدريجياً بوساطة التجربة ، وبدا أنه قانون تجريبى متين من قوانين الطبيعة . ولكن ظهر أننا نستطيع — من متصل « المكان — زمان » الأصلى ، أن ننشئ تعبيراً رياضياً تكون له الصفات التى

---

(١) Isotropy معناها التماثل فى كافة الاتجاهات ، كأن تحتفظ مسطرة بطول واحد حين تشير إلى الشمال أو حين تشير إلى الشرق .

(٢) نظرية النسبية الرياضية ، ص ٢٣٨ .

تجعله يبدو غير قابل للفناء . وحينئذ تكف العبارة القائلة بأن الطاقة لا تفنى عن أن تكون قضية من قضايا الفزياء ، بل تصبح بدلا من ذلك قضية من قضايا اللغة وعلم النفس" . « والطاقة » بوصفها قضية من قضايا اللغة ـــ هى اسم التعبير الرياضى موضع السؤال ، وبوصفها قضية من قضايا علم النفس : هى أن حواسنا مجعولة بحيث نشاهد ما هو التعبير الرياضى إجمالا موضع السؤال ، ونقترب منها أكثر فأكثر كلما هذبنا إدراكاتنا الحسية الغفل بوساطة المشاهدة العلمية . وهذا أقل كثيراً مما اعتاد الفزيائيون أن يعتقدوا فى أنهم عرفوه عن الطاقة ،

وقد يقول القارئ : ماذا يتبقى إذن للفزياء ؟ ماذا تعرف حقاً عن عالم المادة ؟ وهنا يمكن أن نميز ثلاثة أقسام فى الفزياء .. فهناك أولا ما يندرج فى نظرية النسبية المعممة أوسع تعميم ممكن . ثم هناك ثانياً القوانين التى لا يمكن أن تندرج داخل نطاق النسبية . وثالثاً ، هناك ما يمكن أن يسمى بالجغرافيا . فلننظر فى كل قسم من هذه الأقسام على التوالى .

تنبئنا نظرية النسبية ـــ بمعزل عن المواضعات ـــ أن لحوادث الكون نظاماً رباعى الأبعاد ، وأن بين أى حادثتين قريبتين فى هذا النظام ثمة علاقة تسمى « الفاصل » ، وهذا الفاصل قابل للقياس إذا اتخذنا الاحتياطات المناسبة ، كما تنبئنا أيضاً بأنه لا يمكن أن يكون « للحركة المطلقة » أو للمكان المطلق ، أو للزمان المطلق ، أية دلالة فزيائية ، وقوانين الفزياء التى تستخدم هذه المفاهيم غير مقبولة وليس هذا قانوناً فزيائياً فى حد ذاته ، ولكنه بالأحرى قاعدة نافعة تمكننا من أن نرفض بعض القوانين الفزيائية المقترحة على أنها غير مرضية .

وفيما عدا ذلك ، لا تحتوى نظرية النسبية إلا على القليل الذى يمكن أن ينظر إليه بوصفه قوانين فزيائية . فى هذه النظرية قدر كبير من الرياضيات مبيناً أن بعض الكميات المعينة المكونة تكويناً رياضياً ينبغى أن تسلك سلوكا شبيهاً بسلوك الأشياء التى ندركها بحسنا ، وفيها أيضا اقتراح بقنطرة بين علم النفس والفزياء فى هذه النظرية ، بأن هذه الكميات المركبة تركيباً رياضياً هى ما كيفت حواسنا لإدراكه . بيد أن هذا أو ذاك ليسا من الفزياء بالمعنى الدقيق .

وجزء الفزياء الذى لا يمكن فى الوقت الحالى أن يدخل فى نطاق النسبية ، كبير وهام . فليس فى النسبية ما يبين لمـــاذا ينبغى أن توجد إلكترونات وبروتونات ، ولا تستطيع النسبية أن تعطى أى سبب لوجود المـادة فى كتل صغيرة . وهذا هو ميدان نظرية الكم ، التى تفسر كثيراً من صفات المادة على النطاق الضيق . وقد وضعت نظرية الكم لتتسق مع نظرية النسبية الخاصة ، بيد أن كل المحاولات التى بذلت منذذلك الحين لوضع مركب من نظرية الكم ونظرية النسبية العامة قد باءت بالفشل . ويبدو أن هناك صعوبات قاسية جداً تعترض طريق إدراج هذا الجزء من الفزياء داخل إطار النسبية العامة .وهناك فى الوقت الحالى صعوبات لا تقل عن ذلك قسوة فى نظرية الكم نفسها ، ويعتقد كثير من الفزيائيين أن مركباً من نظرية الكم ونظرية النسبية العامة قد يحل بعض هذه الصعوبات. والموقف الحالى ، كما رأيناه ـــ هو أن النسبية العـــامة تعلل صفات المادة على نطاق واسع ـــ تعليلا مرضياً إلى حد كبير، بينما تعلل نظرية الكم صفات المادة على النطاق الضيق جداً تعليلا مرضياً إلى حد كبير .ومهما يكن من أمر ، فلا توجد أية رابطة ظاهرة بين النظريتين اللهم إلا فى أساسهما المشترك فى نظرية النسبية الخاصة . وهذا الموقف غير مرض ، ومن غير المحتمل أن يدوم . ويعتقد أشخاص قلائل أن نظرية النسبية العامة يمكن أن تتسع بطريقة تستطيع معها أن تفسر جميع النتائج التى تفسرها نظرية الكم ، وأن يكون ذلك بطريقة أفضل مما تفعله نظرية الكم . وكان أينشتين فى أواخر أيام حياته من أولئك الذين يعتقدون ذلك ، وأياً كان الأمر ، فإن كثيراً من الفزيائيين فى أيامنا هذه يعتقدون أن هذا الرأى خاطىء .

ونظرية النسبية العامة هى أكثر الأمثلة تطرفاً على ما يمكن أن يسمى طريقة الخطوة ثم الخطوة التى تليها next -to- next methods فلم يعد هناك ما يدعو إلى اعتبار الجاذبية راجعة إلى تأثير الشمس على كوكب سيار ، ولكن يمكن أن نفكر فيها بوصفها معبرة عن سمات المنطقة التى تصادف فيها وجود الكوكب ، ومن المفترض أن تتغير هذه السمات شيئاً فشيئاً ، تدريجياً ، وباستمرار ، لا فى وثبات مفاجئة ، كما يتحرك الإنسان من جزء فى متصل « المكان ـــ زمان » إلى جزء آخر . ويمكن النظر إلى تأثيرات الكهرومغناطيسية بطريقة مماثلة ، ولكن

ما إن نجعل الكهرومغناطيسية متفقة مع نظرية الكم حتى تتغير طبيعتها تغيراً تاماً ، إذ يختفي المظهر المتصل اختفاء كاملا ويحل محله السلوك المنفصل الذى تتميز به — كما رأينا آنفاً — نظرية الكم . وإذا حاولنا — على أية حال — أن نطبق على الجاذبية هذه الأفكار الخاصة بنظرية الكم ، فإننا نجد أنها لا تتلاءم تلاؤماً صحيحاً ، وأنه من الضرورى إدخال شيء من التعديل على هذه النظرية أو على تلك ، أو على كليهما معاً . . . أما ما هو هذا التعديل المطلوب ، فشيء لم نعرفه بعد . وقد يكون من الممكن شرح هذه الصعوبة بطريقة مختلفة نوعاً ما . فحين يشاهد فلكى الشمس ، فإن الشمس تحتفظ بعدم اكتراث متعال لما يقوم به من إجراءات . ولكن ، حين يريد عالم فى الفزياء أن يكتشف ما يحدث لذرة ما ، فإن الجهاز الذى يستخدمه أكبر كثيراً من الشيء الذى يلاحظه بدلا من أن يكون أصغر منه ،ومن المحتمل أن يكون لهذا الجهاز تأثير على الإلكترون. وقد وجد أن أنسب الأجهزة لتحديد موقع ذرة خليق بأن يؤثر على سرعتها ، وأن أفضل الأجهزة لتحديد السرعة كفيل بالتأثير على موقعها . وهذا لا يسبب أية صعوبة حين تكون نظرية الكم للذرات موضوعة لتتمشى مع نظرية النسبية الخاصة ، لأن الجاذبية تهمل فى هذه الحالة . ويفترض أن يكون متصل « المكان — زمان » مستوياً ، سواء أكان فيه ذرات أم لم يكن ، ولكننا إذا حاولنا أن نجعل نظرية الكم متمشية مع نظرية النسبية العامة ، فلا ينبغى إهمال الجاذبية ، وذلك حتى يتوقف منحنى « المكان — زمان » على المناطق المجاورة للذرة . وأيما كان الأمر ، فإن نظرية الكم توضح توضيحاً تاماً — كما رأينا لتونا — أننا لا نستطيع أن نعرف دائماً أين توجد الذرات . وهذا هو أساس الصعوبة .

وأخيراً نصل إلى الجغرافيا ، التى أدخل تحتها التاريخ . والفصل بين التاريخ والجغرافيا يقوم على الفصل بين الزمان والمكان : وحين نمزج الاثنين فى متصل واحد ، فإننا نحتاج إلى كلمة واحدة لوصف مزيج الجغرافيا والتاريخ . وسأستخدم كلمة « جغرافيا » وحدها بهذا المعنى الواسع ، إيثاراً للبساطة .

وتشمل الجغرافيا بهذا المعنى كل ما يميز جزءاً من « متصل الزمان — مكان » عن جزء آخر . فثمة جزء تحتله الشمس ، وثمة جزء آخر تحتله الأرض ،

والمناطق المتوسطة بينهما تحتوى على موجات الضوء ، ولكنها لا تحتوى على أية مادة (اللهم إلا شيء ضئيل جداً هنا أو هناك) . وتوجد درجة معينة من الرابطة النظرية بين الوقائع الجغرافية المختلفة ، وإقرار ذلك هو هدف القوانين الفزيائية .

ونحن فى وضع يتيح لنا بأن نحسب الحقائق الكبيرة عن النظام الشمسى فى الماضى والمستقبل لفترات واسعة من الزمان . ولكننا فى هذه الحسابات جميعاً نحتاج إلى أساس من الواقع الغفل . والوقائع تترابط فيما بينها ، غير أن الوقائع لا يمكن استنباطها إلا من وقائع أخرى فقط ، لا من القوانين العامة وحدها . وهكذا تتخذ وقائع الجغرافيا وضعاً مستقلا معيناً فى الفزياء . ولن يمكننا أى قدر من القوانين الفزيائية من استنباط واقعة فزيائية إلا إذا كنا نعرف وقائع أخرى نتخذها مادة لاستنباطها . وحين أتحدث هنا عن « الوقائع » ، أفكر فى وقائع الجغرافيا الخاصة ، بالمعنى الواسع الذى أستخدم فيه هذه الكلمة .

ونحن نعنى فى نظرية النسبية ، بالبناء لا بالمـــادة التى يتألف منها البناء . أما فى الجغرافيا — فالمادة — من جهة أخرى — هى التى تعنينا . وإذا كان هناك أى اختلاف بين مكان وآخر ، فلابد أن يكون هناك اختلافات فى المادة الموجودة فى هذا المكان عن المادة الموجودة فى المكان الآخر ، أو أن فى أحدهما مادة بينما لا توجد مادة فى المكان الآخر . والاحتمال الأول من هذه الاحتمالات هو الذى يبدو أكثر إرضاء . وقد نحاول أن نقول : توجد إلكترونات وبروتونات والجسيمات الذرية الفرعية الأخرى ، والباقى فارغ . بيد أنه فى المناطق الفارغة توجد موجات الضوء ، بحيث لا نستطيع أن نقول إنه لا يوجد ثمة شيء فيها . بل إننا لا نستطيع وفقا لنظرية الكم — أن نحدد أين توجد الأشياء بالضبط ، وإنما من المحتمل أن يوجد الكترون فى هذا المكان لا فى ذاك . ويعتقد بعض الناس أن الموجات الضوئية ، والجزيئات أيضاً ، مجرد اختلالات فى الأثير ، والبعض الآخر يقنع بقوله إنها مجرد اختلالات فحسب ، بيد أنه على أية حال ، تقع الحوادث حيثما وجدت موجات ضوئية أو جسيمات . وهذا هو كل ما نستطيع أن نقوله عن الأماكن التى يحتمل أن تكون بها طاقة بصورة

أو بأخرى ، ما دامت الطاقة قد انتهت إلى أن تكون بناء رياضياً مشيداً من الحوادث . نستطيع أن نقول إذن إن هناك حوادث فى أرجاء متصل « المكان ــ زمان » جميعاً ، ولكن لابد أن تكون من نوع مختلف إلى حد ما طبقاً للمنطقة التى تتناولها ، وهل تحتوى على إلكترون أو بروتون ، أو هى من نوع المناطق الذى نسمية عادة مناطق خاوية ، أما فيما يتعلق بالطبيعة الأصلية لهذه الحوادث ، فلا نستطيع أن نعرف عنها شيئاً ،اللهم إلا إذا تصادف أنها حوادث فى حيواتنا الخاصة . وينبغى أن تكون إدراكاتنا الحسية ومشاعرنا جزءاً من المادة الخام للحوادث التى ترتبها الفزياء فى نموذج ، أو بالأحرى ، التى تجدها مرتبة فى نموذج . وأما فيما يتعلق بالحوادث التى لا تؤلف جزءاً من حيواتنا الخاصة ، فإن الفزياء تخبرنا بنماذجها . ولكنها عاجزة تماماً عن أن تخبرنا بما هى فى حد ذاتها . ولا يبدو أن هذا من الممكن أن يكتشف بأى منهج آخر .

الفصل الثالث عشر

إلغاء "القوة"

تتحرك الأجسام - وفقاً لنسق نيوتن- فى خطوط مستقيمة وبسرعة منتظمة، إذا لم تخضع لتأثير أية قوى ؛ وحين لا تتحرك الأجسام على هذا النحو ، فإن تغير حركتها يعزى إلى « قوة » ما . وتبدو بعض القوى معقولة بالنسبة لخيالنا : كالقوى التى تبذل بوساطة حبل أو وتر ، أو الناشئة عن اصطدام الأجسام ، أو بأى ضرب ظاهر من ضروب الشد أو الجذب . وفهمنا المتخيل الظاهرى لهذه العمليات ــ وفقاً لما شرحناه فى فصل سابق ــ خاطئ تمام الخطأ ، وكل ما يعنيه حقاً هو أن خبرتنا الماضية تمكننا من التنبؤ ــ قل ذلك أو كثر ــ بما سيجرى دون حاجة إلى حسابات رياضية . بيد أن القوى التى تنطوى عليها الجاذبية ، وأشكال الفعل الكهربائى الأقل ألفة لا تبدو ــ بهذه الطريقة ــ طبيعية لخيالنا . ويبدو من الغريب أن الأرض تطفو فى فراغ ، والشىء الطبيعى الذى نفترضه هو أنها ينبغى أن تسقط. ولهذا لابد من أن ترتكز على فيل ، والفيل على سلحفاة ، كما ذهب إلى ذلك بعض المفكرين القدماء . وقد أدخلت نظرية نيوتن ــ بالإضافة إلى التأثير عن بعد ــ ابتكارين متخيلين آخرين : الابتكار الأول هو أن الجاذبية ليست موجهة دائماً وبصورة جوهرية إلى « أسفل » أى نحو مركز الأرض ؛ والابتكار الثانى هو أن الجسم الذى يدور ويدور فى دائرة بسرعة منتظمة ، « لا يتحرك بانتظام » بالمعنى الذى تستخدم فيه هذه الجملة بالنسبة للأجسام التى لا تخضع لأية قوى ، وإنما تنحرف باستمرار عن المسار المستقيم ، صوب مركز الدائرة ، مما يتطلب قوة تجذبه فى هذا الاتجاه . ومن ثم ، فقد توصل نيوتن إلى الرأى القائل بأن الكواكب السيارة تنجذب إلى الشمس بوساطة قوة ، تسمى الجاذبية .

ولقد نسخت نظرية النسبية ــ كما رأينا ــ هذه النظرة برمتها . فلم تعد

هناك « خطوط مستقيمة » بالمعنى الهندسى القديم ، وإنما هناك « أقرب الخطوط إلى الاستقامة» أو «خطوط جيوديسية» . غير أن هذه تتطلب الزمان تطلبها للمكان. وشعاع الضوء الذى يمر من خلال النظام الشمسى لا يتحرك فى نفس الفلك الذى يتحرك فيه شهاب ما ، من وجهة النظر الهندسية ، ومع ذلك فإن كلا منهما يتحرك وفقا لخط جيوديسى . وهكذا تتغير الصورة المتخيلة بأكملها . وربما قال شاعر إن الماء يجرى هابطاً على سفح الجبل لأنه منجذب نحو البحر ، غير أن الفزيائى أو أى إنسان عادى ، قد يقول إن المياه تتحرك — كما تتحرك — عند كل نقطة ، بسبب طبيعة الأرض فى تلك النقطة دون نظر إلى ما ينتظرها بعيداً عنها . وكما أن البحر لا يسبب جريان الماء نحوه ، فكذلك لا تسبب الشمس تحرك الكواكب حولها . فالكواكب تدور حول الشمس لأن هذا الدوران هو أسهل شىء تستطيع أن تفعله بالمعنى الفنى لأقل حركة ، وهو أسهل شىء تستطيع أن تفعله بسبب طبيعة المنطقة التى توجد فيها تلك الكواكب ، لا بسبب تأثير صادر عن الشمس .

والضرورة المزعومة التى تجعلنا نعزو الجاذبية إلى قوة تجذب الكواكب نحو الشمس قد نشأت عن التصميم على الإبقاء على الهندسة الإقليدية بأى ثمن . فإذا افترضنا أن المكان إقليدى ، على أنه ليس فى الحقيقة كذلك ، فعلينا أن نهيب بالفزياء لتصحح الأخطاء التى تقع فيها هندستنا ، وسنجد أن الأجسام لا تتحرك فيما نصر على اعتباره خطوطاً مستقيمة . وسنطالب بسبب لهذا السلوك . وقد عرض إدنجتون هذه المسألة فى وضوح يبعث على الإعجاب . وقد افترض أن هناك فزيائياً يعتنق صيغة « الفاصل » المستخدمة فى نظرية النسبية الخاصة — وهى صيغة لا زالت تفترض أن مكان المشاهد إقليدياً . ويواصل كلامه قائلا :

«ما دام من الممكن مقارنة الفواصل intervals بالمناهج التجريبية ، فسرعان ما سيكتشف أن صيغته (عن الفاصل) لا يمكن أن تتفق مع نتائج المشاهدة . إلى أن يدرك خطأه . بيد أن العقل لا يتخلص بهذه السرعة من فكرة مستبدة . ومن المرجح أن مشاهدنا سيستقر على رأيه ، وسيعزو انحراف المشاهدات إلى تأثير ما ، يوجد ويؤثر على وجود الأجسام التى يستخدمها فى اختياره . وسيدخل عاملا فائقاً على الطبيعة يستطيع أن يوجه إليه اللوم على نتائج خطئه . والاسم

الذى يطلق على أى عامل يسبب انحرافاً عن الحركة المنتظمة فى خط مستقيم هو « القوة » وفقاً لتعريف نيوتن للقوة . وهكذا يوصف العامل الذى دخل نتيجة لخطأ مشاهدنا على أنه مجال القوة field of force ، ومجال القوة يمثل الفرق بين الهندسة الطبيعية لنظام متسق ، والهندسة المجردة المنسوبة إليه اعتباطاً[1] .

ولو تعلم الناس تصور العالم بهذه الطريقة الجديدة ، دون الفكرة القديمة عن « القوة » ، فسوف يغير ذلك — لا من خيالهم الفزيائى فحسب ، بل من أخلاقهم وسياستهم أيضاً ، وسيكون هذا التأثير الأخير لا منطقياً تماماً ، ولكنه مع ذلك لن يكون أقل احتمالا لهذا السبب عينه ، وتبدو الشمس فى نظرية نيوتن عن النظام الشمسى — أشبه بملك على الكواكب أن تطيع أوامره — أما فى عالم أينشتين فثمة مزيد من الفردية ، وقليل من الحكم عن عالم نيوتن . كما إن النشاط فى عالم أينشتين أقل كثيراً منه فى عالم نيوتن أيضاً : فقد رأينا أن الكسل هو القانون الأساسى فى كون أينشتين . وقد أصبحت كلمة حركى (دينامى) dynamic تعنى بلغة الصحف نشطاً وقوياً . ولكن لو أنها كانت تعنى « تصوير مبادئ الديناميكا » لكان ينبغى أن تطبق على الشعوب فى الأجواء الحارة أولئك الذين يجلسون تحت أشجار الموز ينتظرون أن تسقط الثمار فى أفواههم . وآمل أن يعنى الصحفيون — حين يتحدثون فى المستقبل عن شخصية « دينامية » الشخص الذى يحدث أقل اضطراب فى اللحظة الحاضرة . دون أن يفكر فى النتائج البعيدة . وإذا استطعت أن أسهم فى الوصول إلى هذه النتيجة ، فلن يكون ما كتبت عبثاً .

وقد كان من المعتاد أن يستنبط الناس من قوانين الطبيعة الحجج التى يرتكز عليها ما ينبغى أن نفعله . وهذه الحجج تبدو لى خطأ . ذلك أن محاكاة الطبيعة قد تكون مجرد عبودية . ولكن إذا كان للطبيعة — كما صورها أينشتين — أن تكون نموذجاً لنا ، لبدا أن الفوضويين هم أصحاب الحجة الأقوى . والكون

---

(١) النظرية الرياضية للنسبية ص ٣٧ — ٣٨ . والجملة الموضوع تحتها خط مكتوبة بالحروف المائلة فى الأصل .

الفزيائى منظم لا لأن هناك حكومة مركزية ، بل لأن كل فرد يهتم بشأنه الخاص . وو يصطدم فيه جسمان من المادة أبداً ، وإذا اقترب أحدهما من الآخر اقتراباً لائيقا ، تحرك كل منهما بعيداً عن الآخر . ولو أن رجلا ألقى القبض عليه لأنه ضرب رجلا آخر ضربة قاضية أوقعته على الأرض ، فإنه يكون صادقا من الناحية العلمية ، إذا دافع عن نفسه بأنه لم يلمسه قط ، وما حدث هو وجود تل فى متصل « المكان — زمان » فى منطقة أنف الرجل الآخر ، فكان أن وقع إلى أسفل التل .

ويبدو أن إلغاء « القوة » يتصل بإحلال النظر محل اللمس بوصفه مصدراً للأفكار الفزيائية ، كما شرحنا ذلك فى الفصل الأول . فحين تتحرك صورة فى مرآة ، لا نعتقد أن شيئاً قد دفعها . وفى الأماكن التى توجد بها مرآتان كبيرتان إحداهما فى مواجهة الأخرى . قد نرى انعكاسات لاحصر لها لشىء واحد بعينه. فلنفترض أن شخصاً يضع قبعة عالية على رأسه يقف بين المرآتين ، فسيكون هناك عشرون أو ثلاثون قبعة عالية فى الانعكاسات . وافترض الآن أن شخصاً أوقع قبعة ذلك السيد المهذب بعصا ، فى هذه الحالة ستقع العشرون أو الثلاثون قبعة فى نفس اللحظة . وسنعتقد أن الأمر يحتاج إلى قوة ما للإيقاع بالقبعة العالية الحقيقية ، ولكننا سنعتقد أن القبعات العشرين أو الثلاثين الباقية قد وقعت من تلقاء نفسها — إن صح هذا التعبير — أو من مجرد رغبة فى المحاكاة . فلنحاول أن نفكر فى هذه المسألة بمزيد من الجدية .

من الجلى أن شيئاً ما يحدث حين تتحرك صورة فى مرآة . وتبدو هذه الحادثة — من وجهة نظر البصر — حقيقية تماماً كأنها لم تكن فى مرآة . بيد أن شيئاً لم يحدث من وجهة نظر اللمس أو السمع ، وحين تقع القبعة العالية الحقيقية ، فإنها تحدث ضجة ، أما الانعكاسات العشرون أو الثلاثون فإنها تسقط دون أن تحدث صوتاً ، وإذا سقطت القبعة على طرف قدمك ، فسوف تشعر بها ، ولكننا نعتقد أن الأشخاص العشرين أو الثلاثين فى المرآتين لا يشعرون بشىء ، مع أن القبعات تقع على أطراف أقدامهم أيضاً . غير أن هذا كله صادق بالنسبة لعالم الأفلاك فهذا العالم لا يحدث أية ضجة لأن الصوت لا يمكن أن ينتقل خلال الفراغ .

كما أنه لا يسبب أية « مشاعر » حسبما نعرف — لأنه لا وجود لشخص فى نفس النقطة « للشعور » به . ومن ثم فإن عالم الأفلاك يكاد لا يبدو « حقيقياً » أو « صلباً » كالعالم الموجود فى المرآة ، كما أنه لا يحتاج مثله إلى أية « قوة » لكى تجعله يتحرك .

وربما أحس القارئ أننى أنغمس فى سفسطة لاغناء فيها ، ولعله يقول : هذه الصورة فى المرآة هى على كل حال إنعكاس لشىء صلب والقبعة العالية التى توجد فى المرآة لا تسقط إلا نتيجة للقوة التى استخدمت بالنسبة للقبعة العالية الحقيقية . والقبعة العالية الموجودة فى المرآة لا تستطيع أن تنغمس فى سلوك صنعها ، وإنما عليها أن تكون نسخة من سلوك القبعة الحقيقية . وهذا يبين لنا إلى أى حد تختلف هذه الصورة عن الشمس والكواكب . « لأنها » ليست مرغمة على أن تحاكى باستمرار نموذجاً سابقاً . وهكذا عليك أن تتخلى عن التظاهر بأن صورة ما غير حقيقية مثل صورة الأجرام السماوية .

وهناك بالطبع نصيب من الحقيقة فى هذا القول ، والنقطة هى أن نكتشف ما هى هذه « الحقيقة » على وجه الدقة . فالصور — بادئ ذى بدء — ليست « خيالية » . حين تشاهد صورة ما ، فمن المؤكد أن أمواجاً ضوئية حقيقية تصل إلى عينك ، وإذا علقت رداء على المرآة فسوف تنقطع هذه الموجات الضوئية عن الوجود . ومع ذلك ، فهناك اختلاف بصرى محض بين « الصورة » والشىء « الحقيقى » . وهذا الاختلاف البصرى مرتبط بمسألة المحاكاة هذه . فأنت حين تعلق ثوباً على المرآة ، فإن هذا لا يؤثر على الشىء « الحقيقى » ، ولكنك حين تحرك الشىء الحقيقى بعيداً ، فإن الصورة تختفى أيضاً . وهذا يجعلنا نقول إن الموجات الضوئية التى تصنع الصورة لا تنعكس إلا على سطح المرآة ، وإنها لا تأتى حقاً من نقطة خلفها . بل من الشىء « الحقيقى » . ولدينا هنا مثل لمبدأ على جانب عظيم من الأهمية . فمعظم حوادث الكون ليست منعزلة ، وإنما أعضاء فى مجموعات مماثلة — قل هذا التماثل أو كثر — من الحوادث ، بحيث أن كل مجموعة ترتبط بطريقة محدودة بمنطقة صغيرة معينة من متصل « الزمان — ومكان » . هذا هو الحال بالنسبة للموجات الضوئية التى تجعلنا نرى الشىء

وانعكاسه فى المرآة ، فكلاهما ينبعث عن الشىء بوصفه مركزاً . وإذا وضعت كرة معتمة حول الشىء على مسافة معينة، فإن الشىء وانعكاسه لا يظهران بالنسبة لأية نقطة خارج الكرة . ولقد رأينا أن الجاذبية — على الرغم من أنها لم تعد فعلا عن بعد — فما زالت مرتبطة بمركز ؛ فهناك — إن صح هذا التعبير — تل مرتب ترتيباً متماثلا يحيط بقمتها ، والقمة هى المكان الذى نتصور الجسم فيه ، وهذا المكان مرتبط بمجال الجاذبية موضع البحث . ويجمع الحس السليم — إيثاراً للبساطة — الحوادث التى تؤلف مجموعة واحدة بالمعنى السابق .وحين يرى شخصان الشىء نفسه تقع حادثتان مختلفتان ، ولكنهما حادثتان تنتميان إلى مجموعة واحدة ، وترتبطان بمركز واحد بعينه . وهذا ينطبق أيضاً حين يسمع شخصان نفس الضجة . وهكذا يكون الانعكاس فى مرآة ما أقل « حقيقة » من الشىء « المنعكس » حتى من وجهة نظر بصرية ، لأن الموجات الضوئية لا تنتشر فى « جميع » الاتجاهات من المكان الذى يبدو أن فيه الصورة، وإنما فى اتجاهات أمام المرآة فحسب ، وبقدر ما يبقى الشىء المنعكس فى مكانه . وهذا يصور لنا فائدة تجميع الحوادث المترابطة حول مركز على النحو الذى ارتأيناه آنفاً .

وحين نفحص التغيرات التى تطرأ فى مجموعة من هذه الأشياء نجد أنها نوعان؛ تغيرات لا تؤثر إلا على عضو من المجموعة ، وتغيرات تحدث تعديلات مترابطة فى أعضاء المجموعة كلها . فإذا وضعت شمعة أمام مرآة ، ثم علقت ثوباً على المرآة، فإنك لا تغير إلا إنعكاس الشمعة كما ترى من أماكن متباينة . وإذا أغمضت عينيك ، فإنك تغير مظهرها بالنسبة لك، ولا تغير مظهرها بالنسبة لغيرك . وإذا وضعت كرة حمراء حولها على بعد قدم واحد ، فإنك تغير مظهرها على بعد أية مسافة تزيد على قدم . وأنت، فى هذه الحالات جميعاً لا تنظر إلى الشمعة نفسها على أنها قد تغيرت ، والواقع أنك، فى كل هذه الحالات ، تجد أن هناك مجموعات من التغيرات المرتبطة بمركز مختلف ، أو بعدد من المراكز المختلفة . وحين تغمض عينيك — مثلا — فإن عينيك — لا الشمعة — تبدوان مختلفتين بالنسبة لأى مشاهد آخر ؛ ذلك أن مركز التغييرات التى حدثت موجود فى عينيك . ولكنك حين تطفىء الشمعة ، فإن مظهرها يتغير بالنسبة « لكل مكان » ، وفى هذه الحالة تقول إن التغير قد طرأ على الشمعة . والتغيرات التى تطرأ على شىء ما هى

التغيرات التى تؤثر على مجموعة الحوادث كلها التى تتمركز حول هذا الشىء . وهذا كله ليس سوى تفسير للحس السليم ، ومحاولة لشرح ما نعنيه بقولنا إن صورة الشمعة فى المرآة أقل « حقيقة » من الشمعة . وليست هناك مجموعة مترابطة من الحوادث موجودة كلها حول المكان الذى تبدو فيه الصورة ، وتتمركز التغيرات التى تطرأ فى الصورة عن الشمعة ، لا عن نقطة تتعلق بالمرآة . وهذا يعطى لنا معنى قابلا للتحقق من صدقه عن القضية القائلة إن الصورة ليست « سوى » انعكاس ، كما تمكننا فى الوقت نفسه من أن نعد الأجرام السماوية — وإن كنا لا نستطيع إلا أن نراها ولا نستطيع أن نلمسها — بوصفها أكثر « حقيقة » من الصورة الموجودة فى المرآة .

ونستطيع أن نبدأ الآن فى تفسير فكرة الفطرة السليمة عن « تأثير » جسم على آخر ، وهو تفسير يجب أن نقوم به إذا أردنا أن نفهم حقيقة ما يعنيه إلغاء « القوة » . فلنفترض أنك دخلت حجرة مظلمة ، وأدرت زر الكهرباء ؛ حينئذ يتغير مظهر كل شىء فى الحجرة . ولما كان كل شىء فى الحجرة يصبح مرئياً لأنه يعكس النور الكهربائى ، فإن هذه الحالة مماثلة حقاً لحالة الصورة فى المرآة ، فالنور الكهربائى هنا هو المركز الذى تصدر عنه التغيرات جميعاً ، وفى هذه الحالة ، يفسر « التأثير » بما قلناه آنفاً . وأهم من هذه الحالة ، الحالة التى يكون فيها التأثير حركة . فلنفترض أنك أطلقت سراح نمر وسط حشد من الناس حينئذ سوف يتحركون جميعاً ، وسيكون النمر هو مركز حركاتهم المتباينة . وسيستنتج الشخص الذى يرى الناس ولكنه لا يرى النمر ، أن هناك شيئاً طارداً فى تلك النقطة . ونقول فى هذه الحالة إن للنمر تأثيراً على الناس ،وقد نصف فعل النمر عليهم ، وكأن له طبيعة القوة الطاردة . وأياً كان الأمر ، فنحن نعلم أنهم يلوذون بالفرار بسبب شىء يحدث « لهم » ، لا لمجرد أن النمر موجود حيث هو . إنهم يهربون لأنهم يستطيعون أن يروه وأن يسمعوه ، أى لأن موجات معينة تصل إلى أعينهم وإلى آذانهم ، وإذا أمكن أن تصلهم تلك الموجات دون وجود النمر ، فإنهم سيهربون بنفس السرعة ، لأن المنطقة المجاورة لهم ستبدو غير سارة تماماً .

فلنحاول الآن تطبيق اعتبارات مماثلة على جاذبية الشمس . إن « القوة » التى

مارستها الشمس لا تختلف عن القوة التي يمارسها النمر إلا فى أنها جاذبة بدلاً من أن تكون طاردة . وبدلا من أن تفعل بوساطة موجات الضوء أو الصوت ، فإن الشمس تكتسب قوتها الظاهرة من خلال هذه الحقيقة وهى وجود تغيرات فى متصل « المكان — زمان » حول الشمس من جميع أقطارها . وهذه التغيرات ، وهى أشد بالقرب من مصدرها ، كصوت النمر سواء بسواء ، وكلما ابتعدنا . قلت شيئاً فشيئاً ، والقول بأن الشمس « تسبب » هذه التغيرات فى متصل « المكان — زمان » لا يضيف شيئاً إلى معرفتنا . فما نعرفه هو أن التغيرات تجرى وفقاً لقاعدة معينة ، وأنها تتجمع بصورة متماثلة حول الشمس بوصفها مركزاً . ولا تضيف لغة العلة والمعلول إلا عدداً من التخيلات الخارجة عن الموضوع خروجاً تاماً ، إذ ترتبط بالإرادة ، والتوتر العضلى ، وبأشياء من هذا القبيل . وما نستطيع أن نؤكده — قل ذلك أو كثر — هو مجرد الصيغة التي يتغير وفقاً لها متصل الزمان والمكان بوساطة وجود المادة الجاذبة . وأصح من ذلك : أننا نستطيع أن نؤكد أى نوع من أنواع متصل « المكان — زمان » « يكون » حضور المادة الجاذبة . وحين لا يكون متصل « المكان — زمان » إقليدياً على وجه الدقة — فى منطقة معينة ، ولكنه ذو طابع « لا إقليدى » يظهر أكثر فأكثر كلما اقتربنا من مركز معين ، وحين يخضع الافتراق عن إقليدس لقانون معين ، فإننا نصف هذه الحالة وصفاً موجزاً بأن نقول إن هناك قوة جاذبة فى المركز ، بيد أن هذا ليس سوى مجرد تعليل مختصر لما نعرفه . وما نعرفه يتعلق بالأماكن التي « لا توجد » فيها المادة الجاذبة ، ولا يتعلق بالمكان الذى توجد فيه ، وهكذا ، فإن لغة العلة والمعلول (التي تعد « القوة » حالة جزئية منها) ليست إلا اختزالا مريحاً لأغراض معينة ، ولا تمثل أى شيء له وجود حقيقى فى العالم الفزيائى .

وماذا عن المادة ؟ هل المادة لا تزيد هى أيضاً عن كونها اختزالا مريحاً ؟ ولما كان هذا السؤال سؤالا كبيراً ، فإنه يتطلب فصلا قائماً بذاته .

الفصل الرابع عشر

ما المـادة ؟

السؤال « ما المـادة ؟ » من النوع الذى يسأله الميتافيزيقون ، ويجاب عليه فى كتب هائلة تتسم بغموض يجل عن التصديق . بيد أنى لا أسأل هذا السؤال بوصفى ميتافيزيقياً ، وإنما أسأله كما يسأله شخص يريد أن يكتشف ماهى الأخلاقيات الـكامنة وراء الفزياء الحديثة ونظرية النسبية على وجه التخصيص . ومن الجلى مما عرفناه عن هذه النظرية أن المادة لا يمكن أن نتصورها كما اعتدنا على تصورها من قبل . وأعتقد أننا نستطيع أن نقول الآن ما هو التصور الجديد .

كان هناك تصوران تقليديان للمادة ، وكان لـكل منهما أنصاره منذ أن بدأ التفـكير العلمى النظرى ــ كان هناك الذريون الذين يعتقدون أن المـادة تتألف من كتل صغيرة جداً لا يمكن تقسيمها أبداً ، وكان من المفروض أن هذه الـكتل يصطدم بعضها بالبعض الآخر ، ثم ترتد بطرق متعددة . ولم يعد من المفروض ــ بعد نيوتن ــ أن تصطدم هذه الـكتل بعضها بالبعض الآخر . فعلا ، ولـكنها تتجاذب وتتنافر ، وتتحرك فى أفلاك بعضها حول البعض الآخر وكان هناك أولئك الذين يعتقدون أن شيئاً من المـادة فى كل مكان ، وأن الفراغ الحقيقى مستحيل . وكان ديكارت يعتنق هذا الرأى ، ويعزو حركات الـكواكب إلى دوامات فى الأثير . وتسببت نظرية نيوتن فى الجاذبية فى الغض من قيمة الرأى القائل بأن المادة موجودة فى كل مكان ، وخصوصاً عندما اعتقد نيوتن وتلاميذه أن الضوء راجع إلى جزيئات حقيقية تنتقل من مصدر الضوء . ولـكن ، حين دحضت نظرية الضوء ، وثبت أن الضوء يتألف من موجات ، بعث الأثير من جديد حتى يوجد شىء يمكن أن يتموج . وزاد نصيب الأثير من الاحترام حين وجد أنه يلعب نفس الدور فى الظواهر الـكهرومغناطيسية ، كما يفعل ذلك فى انتشار الضوء . بل كان من المأمول أن تـكون الذرات نوعاً من الحركة فى الأثير . وفى هذه المرحلة ، كان الرأى الذرى عن المادة يعانى فى جملته الأمرين .

فإذا تركنا الآن نظرية النسبية جانباً وجدنا أن الفزياء الحديثة قد زودتنا ببرهان عن التركيب الذرى للمادة العادية ، دون أن تفند الحجج المؤيدة لفكرة الأثير الذى لا يعزى إليه مثل هذا التركيب . وكانت النتيجة نوعاً من التوفيق بين الرأيين ، فأحدهما ينطبق على ما يسمى المادة « الغليظة » ، والآخر ينطبق على الأثير . ولم يكن ثمة شك بالنسبة للإلكترونات والبروتونات ؛ وإن لم يكن من الممكن — كما سنرى ذلك قريباً — تصورها كما كانت الذرات تتصور تصوراً تقليدياً . والحقيقة هى — على ما أعتقد — أن النسبية تتطلب التخلى عن التصور القديم « للمادة » الذى أصابته عدوى الميتافيزيقا المرتبطة بالجوهر ، ويمثل وجهة نظر ليست ضرورية فى الواقع فى معالجة الظواهر . وهذا هو ما علينا الآن أن نبحثه .

كانت قطعة المادة — فى الرأى القديم — شيئاً يبقى كله خلال الزمان . ولا تكون فى أكثر من مكان واحد فى زمن معين . ومن الجلى أن هذه الطريقة فى النظر إلى الأشياء مرتبطة بالانفصال التام بين المكان والزمان الذى كان الناس يؤمنون به سابقاً . وحين نستبدل متصل « الزمان — مكان » بالزمان والمكان ، فإن من الطبيعى أن نتوقع اشتقاق العالم الفزيائى من مقومات محدودة فى المكان والزمان على السواء . وهذه المقومات هى ما نسميه « الحوادث » . والحادثة لا تبقى ولا تتحرك كقطعة المادة التقليدية ، إنها توجد فى اللحظة التى تقع فيها ، ثم تنتهى . وهكذا تتحلل قطعة المادة إلى سلسلة من الحوادث . وكما كان الجسم الممتد — فى الرأى القديم — مكوناً من عدد من الجسيمات ، فكذلك كل جسيم — لأنه ممتد فى الزمان — ينبغى أن ينظر إليه على أنه مؤلف مما يمكن أن نسميه « جسيمات — حادثية » event-particles وجموعة سلاسل هذه الحوادث هى التى تؤلف تاريخ الجسيم كله ، وينظر إلى الجسيم « على أنه » تاريخه ، لا على أنه كيان ميتافيزيقى تحدث له تلك الحوادث . وقد أصبح هذا الرأى ضرورياً نظراً لأن النسبية ترغمنا على أن نضع الزمان والمكان فى مستوى واحد لم يكونا عليه فى الفزياء القديمة .

وينبغى أن يربط هذا المطلب المجرد بالحقائق المعروفة عن العالم الفزيائى .

والآن ، ما هى هذه الحقائق المعروفة ؟ فلنسلم بأن الضوء يتكون من موجات تتحرك بالسرعة المتلقاة ، ثم إننا نعرف قدراً كبيراً عما يجرى فى أجزاء متصل « الزمان — مكان » ، حيث لا توجد مادة ، نحن نعرف مثلا أن هناك وقائع دورية (هى موجات الضوء) تخضع لقوانين معينة. هذه الموجات الضوئية تبدأ من الذرات ، وتمكننا النظرية الحديثة عن تركيب الذرة من معرفة قدر كبير عن الظروف التى تبدأ فيها ،والأسباب التى تحدد أطوال موجاتها . ونحن نستطيع أن نعرف لا كيف تنتقل الموجات الضوئية فحسب ، بل كيف يتحرك مصدرها بالنسبة إلينا ، ولكننى حينما أقول ذلك أفترض أننا نستطيع أن نتعرف على مصدر للضوء بوصفه واحداً لم يتغير فى وقتين مختلفين اختلافاً طفيفاً ، وهذا هو — على كل حال — ما ينبغى بحثه .

رأينا فى الفصل السابق كيف أن مجموعة من الحوادث المترابطة يمكن أن يتم تكوينها بحيث تكون كلها متعلقة بعضها بالبعض الآخر ، وكلها مرتبطة حول مركز فى متصل الزمان — مكان . ومثل هذه المجموعة من الحوادث ستكون وصول موجات الضوء المنبعثة من ومضة ضوء قصيرة ، إلى أماكن متباينة.ولسنا بحاجة إلى افتراض أن شيئاً خاصاً يحدث عند المركز . ومن المؤكد أننا لا نحتاج إلى افتراض أننا نعلم « ما » يحدث هناك . إن ما نعرفه — كمسألة من مسائل الهندسة — هو أن مجموعة الحوادث — موضع الكلام — مرتبة حول مركز كالدوائر التى تتسع فى بركة ماء حين تلسها ذبابة ونستطيع أن نختلق افتراضاً واقعة تكون قد حدثت عند المركز ، ونشرع فى وضع قوانين ، ننقل بمقتضاها الاضطراب الناتج . وستبدو هذه الواقعة الافتراضية حينذاك بالنسبة للفطرة السليمة على أنها « سبب » الاضطراب ،وستعد أيضاً حادثة فى تاريخ حياة الجسم المادى الذى نفترض أنه يحتل مركز هذا الاضطراب .

والآن لا نجد أن موجة الضوء تنتقل إلى الأمام من مركز ما طبقاً لقانون معين فحسب ، بل إنها تتبع أيضاً — وبوجه عام — بموجات ضوئية أخرى مماثلة لها أشد المماثلة . فالشمس — مثلا — لا تغير مظهرها فجأة ، بل إنه حين تعبرها سحابة أثناء ريح عاصفة، يكون الانتقال تدريجياً ، وإن يكن سريعاً . وعلى

هذا النحو تقوم علاقة بين مجموعة من الوقائع المرتبطة بمرز عند نقطة واحدة من متصل « الزمان — مكان » ، وبين مجموعات مماثلة جداً توجد مراكزها فى نقاط مجاورة من متصل « المكان — زمان » . ولكل من هذه المجموعات الأخرى تخترع الفطرة السليمة وقائع افتراضية مماثلة لتحتل مراكزها ، وتقول إن هذه الوقائع الافتراضية جميعاً جزء من تاريخ واحد ، أى أنها تخترع جسيماً افتراضياً تحدث له تلك الوقائع الافتراضية . وبهذا الاستعمال المزدوج للافتراض الذى لا ضرورة له تماماً فى كل حالة من تلك الحالات، نصل - به وحده - إلى ما يمكن أن يسمى « مادة » بالمعنى القديم لهذه الكلمة .

وإذا أردنا أن نتحاشى الافتراضات التى لا ضرورة لها ، قلنا إن الذرة فى لحظة معينة « هى » الاضطرابات المتباينة فى الوسط المحيط التى يقال عنها - باللغة العادية - إنها « نتجت » عنها . بيد أننا لن نأخذ هذه الاضطرابات فى تلك اللحظة المعينة بالنسبة لنا ، لأن ذلك سيجعلها تتوقف على المشاهد ، ولكننا سنتحرك بدلا من ذلك متجهين خارج الذرة بسرعة الضوء ، على أن نأخذ كل اضطراب نجده فى كل مكان حالما نصل إليه .ومجموعة الاضطرابات المتشابهة تشابهاً وثيقاً، والتى لها تقريباً نفس المركز، ذلك المركز الذى نعثر عليه موجوداً قبل ذلك أو بعد ذلك بقليل ، سيعرف بأنه الذرة فى لحظة، قبل أو بعد ذلك بقليل. وعلى هذا النحو نحافظ على قوانين الفزياء جميعاً دون اللجوء إلى افتراضات لا ضرورة لها ، أو إلى كيانات مستنبطة ، ونظل فى انسجام مع مبدأ الاقتصاد العام الذى مكن نظرية النسبية من التخلص من كثير من الشوائب التى لا غناء فيها .

وتتخيل الفطرة السليمة أنها حين ترى منضدة ، فإنها ترى منضدة وهذا وهم غليظ . ذلك أنه حين ترى الفطرة السليمة منضدة ، فإن موجات ضوئية معينة تصل إلى العينين ، وهاتان مجعولتان على نحو يرتبط فى خبرتهما السابقة بإحساسات معينة من اللمس ، وكذلك بشهادة أناس آخرين بأنهم قد رأوا المنضدة بدورهم، بيد أن شيئاً من هذا لا يحملنا إلى المنضدة نفسها على الإطلاق. فالموجات الضوئية قد سببت أحداثاً فى عيوننا ، وهذه سببت أحداثاً فى عصبنا البصرى، وهذا سبب بدوره أحداثاً فى المخ . وأى واحد من هذه الأشياء يحدث بدون التمهيدات

المعتادة ، يجعلنا نشعر بالإحساسات التي نسميها « رؤية المنضدة » . حتى لو لم تكن هناك منضدة . (وبالطبع لو أن المادة فسرت عموماً بأنها مجموعة من الأحداث ، فينبغي أن يطبق هذا أيضاً على العين ، وعلى العصب البصرى وعلى المخ) . أما فيما يتعلق بإحساس اللمس حين نضغط على المنضدة بأصابعنا ، فإن هذا عبارة عن اضطراب كهربائى يحدث لإلكترونات وبروتونات أطراف أصابعنا . وينتج طبقا للفزياء الحديثة عن تجاور الإلكترونات والبروتونات فى المنضدة . ولو أثير هذا الاضطراب نفسه فى أطراف أصابعنا بأية طريقة أخرى ، فسوف نشعر بتلك الإحساسات على الرغم من عدم وجود أية منضدة . ومن الواضح أن شهادة الآخرين مسألة ثانوية . ولو سئل شاهد فى محكمة عما إذا كان قد شاهد واقعة معينة ، فلن يسمح له بأن يجيب بأنه يعتقد ذلك ، لأن شهادة الآخرين تؤكد وقوع هذه الحادثة . وعلى أية حال ، فإن الشهادة تتألف من موجات صوتية ، وتتطلب تفسيراً نفسياً ، تطلبها للتفسير الفزيائى سواء بسواء ، ومن ثم فإن ارتباطها بالموضوع غير مباشر إلى حد بعيد . ولهذه الأسباب جميعاً ، حين نقول إن رجلا « يرى منضدة » فإننا نستخدم تعبيراً مختصراً اختصاراً شديداً ، يخفى وراءه استدلالات معقدة صعبة ، يمكن أن تكون صحتها موضع سؤال .

بيد أننا معرضون لخطر التورط فى المسائل النفسية ، وهى مسائل ينبغى أن نتجنبها كلما استطعنا إلى ذلك سبيلا . فلنعد إذن إلى وجهة النظر الفزيائية البحتة .

وما أريد أن اقترحه يمكن أن يوضع على النحو التالى : إن كل ما يحدث فى مكان آخر ، نتيجة لوجود ذرة ، يمكن كشفه تجريبياً ، أو على الأقل نظرياً ، اللهم إلا إذا كان يحدث بطرق خفية معينة . غير أن ما يحدث داخل الذرة (إذا كان ثمة ما يحدث هناك) فإن من المحال معرفته على الإطلاق . فليس من الممكن تصور جهاز يمكن أن نحصل به ولو على لمحة من ذلك ، والذرة تعرف « بتأثيراتها » بيد أن كلمة « تأثيرات » تنتمى إلى رأى فى السببية لا يتلاءم مع الفزياء الحديثة ، وعلى الأخص لا يتلاءم مع نظرية النسبية . وكل ما لنا

الحق فى أن نقوله هو أن مجموعات معينة من الأحداث تحدث معاً ، أى فى أجزاء متجاورة من متصل « المكان — زمان » وقد ينظر مشاهد معين إلى عضو من المجموعة قبل عضو آخر ، غير أن مشاهداً آخر قد يحكم على النظام الزمنى حكماً مختلفاً . وحتى حين يكون النظام الزمنى واحداً بالنسبة للمشاهدين جميعاً ، فإن كل ما لدينا حقاً عبارة عن رابطة بين حادثتين يمكن أن تصدق ، أماماً وخلفاً على السواء . وليس من الحق أن الماضى يحدد المستقبل بمعنى آخر غير المعنى الذى يحدد به المستقبل الماضى، والاختلاف الظاهر لا يرجع إلا إلى جهلنا وحده ، لأننا نعرف عن المستقبل أقل مما نعرفه عن الماضى . وهذا شىء عرضى بحت ؛ فربما وجدت كائنات تتذكر المستقبل لتستنبط منه الماضى . ومشاعر مثل هذه الكائنات فى تلك الأمور ، تكون حينئذ على النقيض من مشاعرنا تماماً ، ولكنها لن تكون زائفة لهذا السبب .

ومن الواضح وضوحاً معقولا أن جميع حقائق الفزياء وقوانينها يمكن أن تفسر دون افتراض أن المادة شىء آخر سوى مجموعات من الأحداث ، بحيث تكون كل حادثة على نحو ينبغى أن ننظر إليه طبيعياً بوصفه « ناتجاً » عن المادة موضوع الكلام . وهذا لا يقتضى أى تغير فى رموز أو صيغ الفزياء ؛ فالمسألة مجرد تفسير للرموز .

وهذا التوسع فى التفسير سمة مميزة للفزياء الرياضية . فما نعرفه عبارة عن علاقات منطقية معينة مجردة تجريداً شديداً . علاقات نعبر عنها فى معادلات رياضية ونعرف أيضاً أننا نصل — عند نقاط معينة — إلى نتائج يمكن اختبارها تجريبياً . خذ مثلا مشاهدات الكسوف التى تأسست عليها نظرية أينشتين عن انحناء الضوء . وكانت المشاهدة الفعلية تتألف من القياس الدقيق لأبعاد معينة على شرائح فوتوغرافية معينة ، وكانت المعادلات المطلوب التحقق من صدقها تتعلق بمسار الضوء فى عبوره على مقربة من الشمس . ومع أنه ينبغى تفسير الجزء الخاص من هذه المعادلات — وهو الجزء الذى يعطى النتيجة الملحوظة — دائماً بنفس الطريقة ، فقد يكون الجزء الآخر منها قابلا لمجموعة متنوعة كبيرة من التفسيرات .. والمعادلات التى تعطى حركات الكواكب السيارة تكاد تكون هى نفسها فى نظرية أينشتين ونظرية نيوتن على السواء . بيد أن معنى المعادلات مختلف تمام الاختلاف .

ويمكن أن يقال — على وجه العموم — إننا نستطيع في المعالجة الرياضية للطبيعة. أن نكون أشد يقيناً من أن معادلاتنا صحيحة تقريباً من يقيننا من صحة هذا التفسير أو ذاك لها . وكذلك بالنسبة للحالة التي يتعرض لها هذا الفصل ، ذلك أن السؤال الذي يتعلق بطبيعة الإلكترون أو البروتون لا يجاب عليه إطلاقاً حين نعرف كل ما تستطيع الفزياء الرياضية أن تقوله عن قوانين حركاته ، وقوانين تفاعله مع بيئته . والإجابة المحددة الحاسمة على سؤالنا ليست ممكنة لأن مجموعة متنوعة من الأجوبة يمكن أن تتفق مع حقيقة الفزياء الرياضية . ومع ذلك فإن بعض الأجوبة مفضل على البعض الآخر ، وذلك لأن بعضها يؤيده احتمال أعظم . وقد كنا نسعى في هذا الفصل إلى تعريف المادة بحيث ينبغي أن يكون هناك مايسمى بهذا الاسم ، لو أن معادلات الفزياء صادقة . فإذا كنا قد وضعنا تعريفنا بحيث إن جسيماً من المادة ينبغي أن يكون ما يعتقد المرء أنه كتلة جوهرية صلبة محددة ، فإنه ما كان ينبغي أن نكون «موقنين» من أن مثل هذا الشيء موجود. ولهذا السبب كان تعريفنا — على الرغم مما قد يبدو عليه من التعقيد — مفضلا من وجهة نظر الاقتصاد المنطقي والحذر العلمي .

الفصل الخامس عشر

النتائج الفلسفية

ليست النتائج الفلسفية لنظرية النسبية عظيمة أو مذهلة كما يعتقد أحياناً، فهي تلقي ضوءاً ضئيلا جداً على المنازعات الموقرة كتلك المنازعات القائمة بين الواقعية والمثالية. ويعتقد بعض الناس أنها تؤيد رأي «كانت» القائل بأن المكان والزمان «ذاتيان» subjective وأنهما شكلان من «أشكال العيان» forms of intuition وأعتقد أن مثل هؤلاء الناس قد أضلتهم الطريقة التي يتحدث بها كتاب النسبية عن «المشاهد». فمن الطبيعي افتراض أن المشاهد كائن إنساني، أو على الأقل افتراض أنه عقل، ولكنه من الممكن أن يكون لوحة فوتوغرافية أو ساعة. وهذا معناه إن النتائج الغريبة المتعلقة بالاختلاف بين وجهة نظر ووجهة نظر أخرى، تتم بوجهة النظر بالمعنى المستخدم للأدوات الفزيائية كما هو مستخدم بالنسبة للناس ذوي الإدراكات الحسية. «فالذاتية» المذكورة في نظرية النسبية هي ذاتية «فزيائية» من الممكن أن توجد إن لم تكن ثمة عقول أو حواس في العالم.

وفضلا عن ذلك فإنها ذاتية محدودة جداً، والنظرية لا تقول إن «كل شيء» نسبي، ولكنها على العكس تعطي طريقة فنية (تكنيك) للتفرقة بين ما هو نسبي وبين ما ينتسب لحادثة فزيائية صميمة. فإذا كنا سنقول إن النظرية تؤيد «كانت» في رأيه عن المكان والزمان، فعلينا أن نقول إنها تدحضه فيما يتعلق بمتصل «المكان — زمان». ولا أرى سبباً يدعو الفلاسفة ألا يتمسكوا — في مثل هذه القضايا — بالآراء التي سبق أن اعتنقوها. فلم تكن ثمة حجج حاسمة تؤيد أحد الجانبين من قبل، ولا توجد مثل هذه الحجج الآن، والتمسك برأي منهما يدل على مزاج قطعي أكثر مما يدل على مزاج علمي.

ومع ذلك ، فإنه حينما تصبح الأفكار المنبثة فى مؤلفات أينشتين مألوفة ، كما ستصبح حين تلقن فى المدارس ، فإن تغييرات معينة فى عاداتنا الفكرية سوف تنتج عن ذلك ، وسيكون لها أهمية عظمى على المدى الطويل .

وهناك شىء ستسفر عنه هـذه التغييرات وهو أن الفزياء تخبرنا عن العالم الفزيائى أقل كثيراً مما كنا نعتقد . وسينتهى الأمر « بالمبادئ العظمى » جميعاً فى الفزياء التقليدية إلى أن تكون أشبه «بالقانون الأعظم » القائل بأن هناك دائماً ثلاثة أقدام فى الياردة ، وسيظهر أن بعض القوانين الأخرى باطلة تماماً . ويمكن أن يفيدنا قانون بقاء الكتلة فى تصوير هذين المآلين التعسين اللذين يمكن أن ينتهى إليهما « قانون » ما . وقد اعتدنا على تعريف الكتلة بأنها « كمية المادة » وهذه الكمية لا تزيد ولا تنقص أبداً كما تثبت التجربة ذلك. بيد أن ازدياد الدقة فى القياسات الحديثة أسفر عن حدوث أمور عجيبة . فقد وجد فى المقام الأول أن الكتلة — وفقا للقياس — تزداد مع ازدياد السرعة ، ووجد أن هذا النوع من الكتلة هو الطاقة نفسها حقاً . وهذا النوع من الكتلة ليس ثابتاً بالنسبة لجسم معين . وأياً كان الأمر ، فقد كان ينبغى النظر إلى القانون نفسه على أنه تحصيل حاصل ، ومن طبيعة القانون القائل إن هناك ثلاثة أقدام فى الياردة ، وهذا ناتج عن طرائقنا فى القياس Measurement ولا يعبر عن خاصية حقيقية من خواص المادة . والنوع الآخر من الكتلة الذى يمكن أن نسميه « الكتلة الحقيقية » ، هو الكتلة التى يجدها مشاهد يتحرك مع الجسم . وهذه هى الحالة الأرضية العادية حيث لا يكون الجسم الذى تزنه طائراً فى الهواء . وتكاد تكون « الكتلة الحقيقية » لجسم ما ثابتة ، ولكنها ليست ثابتة تماماً . ومن الممكن افتراض أنه لو كان لديك أربعة أوزان يزن كل منها رطلا ، ووضعتها معاً كلها فى الميزان ، فإنها ستزن كلها أربعة أرطال . وهذا محض خيال ، ذلك أنها تزن أقل ، وإن لم يكن أقل بمقدار يمكن اكتشافه بأدق القياسات . أما فى حالة أربع ذرات من الأيدروجين حين توضع معاً لتكوين ذرة هليوم واحدة ، فإن هذا النقص يكون ملحوظا ، إذ أن ذرة الهليوم تزن أقل — بصورة يمكن قياسها من أربع ذرات منفصلة من الأيدروجين .

وبالإجمال ، لقد تحطمت الفزياء التقليدية إلى جزأين : تحصيل الحاصل ، والجغرافيا .

وليس العالم الذى تقدمه نظرية النسبية لخيالنا عالم « أشياء » فى حركة ، بقدر ماهو عالم «حوادث» . ومن الحق أنه مازل هناك جسيمات يبدو أنها تبقى ، بيد أن هذه الجسيمات (كما رأينا فى الفصل السابق) يمكن تصورها حقاً بوصفها خيوطاً من الحوادث المترابطة ، وكأنها نغمات متعاقبة فى أغنية . « الحوادث » هى النسيج الذى تتألف منه فزياء النسبية . وبين كل حادثتين لاتبعد إحداهما عن الأخرى بعداً شديداً توجد علاقة قابلة للقياس — سواء فى النظرية العامة أو الخاصة — وتسمى «الفاصل» ويبدو أن هذا الفاصل هو الحقيقة الفزيائية التى تعد البرهة من الزمان والمسافة فى المكان ممثلين غامضين لها ، قل هذا الغموض أو كثر . ولايوجد بين حادثتين متباعدتين أى فاصل واحد محدد ، وإنما هناك طريقة واحدة للتحرك من حادثة إلى الأخرى — وهى الطريقة التى تجعل مجموع الفواصل الصغيرة جميعاً على طول الطريق أكبر مما لو سلكنا أى طريق آخر . وهذا الطريق يسمى خط جيوديسى وهو الطريق الذى يختاره الجسم إذا ترك لنفسه .

وفزياء النسبية كلها يمكن أن تعد مسألة تقوم على التقدم « خطوة خطوة » أكثر مما كانت عليه الفزياء أو الهندسة فى سالف الأيام . إذ ينبغى أن تحل محل خطوط إقليدس المستقيمة أشعة الضوء ، التى لاتصل إلى معيار إقليدس فى الاستقامة حين تعبر بالقرب من الشمس أو من أى جسم ثقيل آخر . ومازال من المعتقد أن مجموع زوايا المثلث قائمتان فى المناطق الصغيرة جداً من المكان الفارغ ، لا فى أية منطقة ممتدة . ومامن مكان نستطيع أن نجد فيه إقليدس صادقاً تمام الصدق . والقضايا التى اعتدنا على البرهنة عليها بالقياس قد أصبحت الآن إما مواصفات وإما مجرد حقائق تقريبية نتحقق من صدقها بالمشاهدة .

ومن الحقائق الغريبة — التى ليست نظرية النسبية مثلها الوحيد — أنه كلما تقدم التفكير ، فإن دعواه فى القدرة على إثبات الحقائق تضعف ، وتضعف . وكان من المعتقد عادة أن المنطق يعلمنا كيف نجرى الاستنتاجات ، ولكنه يعلمنا الآن ، كيف لا نجرى الاستنتاجات . والحيوانات

والأطفال يميلون ميلا رهيباً إلى الاستنتاج : فالحصان يدهش دهشة لاحد لها إذا استدرت به استدارة غير مألوفة . وحين بدأ الناس فى التفكير ، حاولوا تبرير الاستنتاجات التى استخرجوها دون تفكير فى عصورهم المبكرة . وقد نتج قدر كبير من الفلسفة الرديئة والعلم الردئ عن هذا النزوع . والمبادئ العظمى ، مثل تجانس الطبيعة ، وقانون « السببية الكلية » law of universal causation وما إلى ذلك ، ماهى إلا محاولات لتدعيم اعتقادنا فى أن ماحدث كثيراً من قبل سيحدث مرة أخرى ، وهذا الاعتقاد ليس أمتن فى الأساس الذى يقوم عليه من اعتقاد الحصان فى أنك سوف تدور الدورة التى تأخذها عادة . وليس من اليسير أن نرى ما يحل محل هذه المبادئ الزائفة فى تطبيق العلم ، ولكن ربما أعطتنا نظرية النسبية لمحة عن نوع الشىء الذى يمكن أن نتوقعه . ولم يعد للسببية — بمعناها القديم — مكان فى الفزياء النظرية . وهنـــاك بالطبع . شىء آخر يحل محلها ، ولكن يبدو أن هذا البديل يقوم على أساس تجريبى أفضل من الأساس الذى كان يقوم عليه المبدأ القديم .

وينبغى أن يؤثر انهيار فكرة الزمان الواحد الشامل لكل شىء ، والذى يمكن أن تؤرخ به جميع حوادث الكون — ينبغى أن يؤثر فى المدى الطويل على آرائنا فى العلة والنتيجة وفى التطور ، وفى مسائل أخرى كثيرة . وربما توقف هذا السؤال — مثلا — عما إذا كان ثمة تقدم فى الكون بوجه عام — ربما توقف على اختيارنا لمقياس للزمان . فإذا اخترنا ساعة من بين عدد من الساعات تتساوى فى دقتها ، فربما وجدنا الكون يتقدم بالسرعة التى يعتقد أشد الأمريكيين تفاؤلا أن الكون يتقدم بها ، وإذا اخترنا ساعة أخرى لاتقـــل عن ذلك دقة ، فربما وجدنا أن الكون يسير من سىء إلى أسوأ بالسرعة التى يتخيلها أشد السلافيين سوداوية . وهكذا نجد أن التفاؤل والتشاؤم لايتصفان بالصدق أو بالكذب وإنما يتوقفان على اختيار الساعات .

ويؤثر ذلك على نمط معين من العواطف تأثيراً مدمراً ، والشاعر يتحدث عن:

« حادث إلهى واحد بعيد

تتحرك صوبه الخليقة بأسرها . »

ولكن إذا كانت الحادثة بعيدة بعداً كافياً ، والخليقة تتحرك بسرعة كافية فإن بعض الأجزاء سوف تحكم بأن هذه الحادثة قد وقعت فعلا ، بينا ستحكم بعض الأجزاء الأخرى بأنها مازالت فى طى المستقبل . وهذا يفسد ذلك البيت من الشعر ، وكان ينبغى أن يكون الشطر الثانى هكذا :

« تتحرك صوبه بعض أجزاء الخليقة ، بينا .

تتحرك أجزاء أخرى متجاوزة إياه . »

بيد أن هذا لا يغنى شيئاً ، وأعتقد أن العاطفة التى يمكن أن يحطمها قليل من الرياضة ليست عاطفة حقيقية ، أو ذات قيمة . غير أن هذا الضرب من الجدال قد يؤدى إلى نقد العصر الفيكتورى ، وهذا موضوع يخرج عن نطاق بحثى .

وأكرر ، أن ما نعرفه عن العالم الفزيائى أشد تجريداً بكثير مما كان يفترض من قبل فهناك بين الأجسام تقع حوادث ، كالموجات الضوئية ، وعن « قوانين » هذه الحوادث نعرف شيئاً ما بالقدر الذى يمكن أن نعبر عنه فى معادلات رياضية. أما عن « طبيعة » هذه الحوادث فلا نعرف شيئاً ، وعن الأجسام نفسها ، نعرف القليل — كما رأينا فى الفصل السابق — بحيث لا نستطيع التأكد من أنها شىء ما : فربما كانت مجرد مجموعات من الحوادث فى أماكن أخرى ، تلك الحوادث التى ينبغى أن نعدها آثارها على نحو طبيعى . ونحن نفسر العالم بالطبع تفسيراً تصويرياً pictorially ، أعنى أننا نتخيل ما يجرى فى الكون شبيها بما نراه . غير أن هذا التشابه لا يمكن أن يمتد فى الواقع إلا إلى بعض الصفات المنطقية الصورية التى تعبر عن البناء ، بحيث إن كل ما نستطيع أن نعرفه هو بعض السمات العامة المعينة لتغيراته . ولعلنا لو ضربنا مثلا لأمكن توضيح هذه المسألة . هناك بين مقطوعة الموسيقى الأوركسترالية كما تعزف ، وبين هذه المقطوعة نفسها من الموسيقى كما تطبع فى المدونة الموسيقية تشابهاً معيناً ، يمكن أن يوصف بأنه تشابه فى البناء ، وهذا التشابه قائم على نحو يمكنك معه — إذا كنت تعرف القواعد — أن تستنتج الموسيقى من المدونة ، أو المدونة من الموسيقى . ولكن ، فلنفترض أنك أصم منذ ولادتك ، ولكنك تعيش بين أهل الموسيقى . حينئذ تستطيع أن تفهم — إذا كنت قد تعلمت الكلام أو قراءة حركة الشفاه أن المدونات الموسيقية تمثل

شيئاً مختلفاً عن نفسها من حيث الكيفية intrinsic الأصلية (أو الذاتية) ، وإن تكن مماثلة فى البناء(١) . وستكون قيمة الموسيقى متعذرة تماماً على تخيلك، ولكنك تستطيع أن تستنبط سماتها الرياضية جميعاً ، ما دامت هى نفس السمات الموجودة فى المدونة . معرفتنا بالطبيعة شيء مشابه لذلك ، فنحن نستطيع أن نقرأ المدونات ، وأن نستنبط كل ما يستطيع الشخص الأصم أن يستنبطه عن الموسيقى ، ولكننا لا نمتلك المزايا التى استمدها من اختلاطه بأهل الموسيقى . ونحن لا نستطيع أن نعرف ما إذا كانت الموسيقى التى تمثلها المدونات جميلة أو بشعة ، وربما ، لم نكن نستطيع التأكد تماماً — فى نهاية التحليل — من أن المدونات تمثل أى شيء سوى نفسها . غير أن هذا شك لا يستطيع الرجل الفزيائى — بقدرته المهنية — أن يسمح لنفسه بالتفكير فيه .

فإذا سلمنا بأقصى ما نستطيع أن تدعيه الفزياء لنفسها ، فإنها لا تخبرنا بذلك الذى يتغير ، أو ماهى حالاته المتباينة ، إنها لا تنبئنا بشيء آخر سوى أن التغيرات يتبع بعضها البعض الآخر دورياً ، أو أنها تنتشر بسرعة معينة . وحتى الآن لم نبلغ بعد نهاية العملية الخاصة بانتزاع ما هو محض خيال ، لكى نصل إلى لباب المعرفة الفعلية الحقيقية . ولقد أنجزت نظرية النسبية قدراً كبيراً جداً فى هذا المجال ، وهى بهذا العمل قد قربتنا أكثر فأكثر إلى البناء البحت الذى هو هدف الرياضى — لا لأنه الشيء الوحيد الذى يهتم به بوصفه إنساناً ، ولكن لأنه الشيء الوحيد الذى يستطيع التعبير عنه فى معادلات رياضية . ولكن على قدر ما أوغلنا فى اتجاه التجديد ، فقد يكون علينا أن نتوغل إلى أبعد من ذلك .

ولقد اقترحت — فى الفصل السابق — ما يمكن أن يسمى التعريف الأدنى للمادة ، أعنى التعريف الذى تكون للمادة فيه — إن صح هذا التعبير — أقل قدر من « الجوهر » بما يتفق مع حقيقة الفزياء . وفى اعتناقنا لتعريف من هذا النوع ، نؤثر جوانب السلامة : ذلك أن مادتنا الهزيلة سوف توجد ، حتى ولو كان هناك شيء أقوى من ذلك موجوداً أيضاً . لقد حاولنا أن نجعل تعريفنا للمادة أشبه بتريد إيزابيلا كما وصفته « جين أوستن » ، « رقيقاً » ، ولكنه ليس رقيقاً

---

(١) لتعريف كلمة « بناء » Structure راجع كتاب المؤلف « مقدمة للفلسفة الرياضية » .

جداً » . ومع ذلك ، نقع فى الخطأ إذا أكدنا تأكيداً قاطعاً أن المادة ليست أكثر من ذلك . وكان ليبنتس يعتقد أن قطعة من المادة هى حقاً مستعمرة من الأرواح . وليس ثمة ما يثبت أنه كان على خطأ ، وإن لم يكن ثمة أيضاً ما يثبت أنه كان على حق : فنحن لا نعرف عنها فى هذا الاتجاه أو ذاك أكثر مما نعرف عن نبات المريخ وحيوانه .

وقد يبدو الطابع المجرد الذى تتسم به معرفتنا الفزيائية غير مرض بالنسبة للعقل غير الرياضى . وربما كان ذلك أمراً مؤسفاً من وجهة النظر الفنية أو الخيالية ولكنه شيء لا قيمة له من وجهة النظر العملية . والتجريد — على ما فيه من صعوبة — هو مصدر القوة العملية . ورجل المال الذى تكون معاملاته مع العالم أشد تجريداً من أى رجل « عملى آخر » هو أيضاً أقوى من أى رجل عملى آخر . وهو يستطيع أن يتاجر فى القمح أو القطن دون حاجة إلى رؤية أى منهما : وكل ما يحتاج إلى معرفته هو هل تصعد أسعارهما أم تهبط . هذه هى المعرفة الرياضية المجردة ، إذا قورنت على الأقل بمعرفة رجل الزراعة . وشبيه بهذا رجل الفزياء الذى لا يعرف عن المادة شيئاً اللهم إلا بعض القوانين المعينة عن حركاتها ، ومع ذلك فإنه يعرف ما يكفى ليجعله قادراً على تناولها علمياً . فهو يصل — بعد أن يعمل خلال سلاسل طويلة من المعادلات تمثل فيها الرموز أشياء لن نعرف أبداً طبيعتها الحقيقية — يصل أخيراً إلى نتيجة يمكن أن تفسر فى حدود إدراكاتنا الحسية ، وأن ينتفع بها لإحداث آثار مرغوبة فى حياتنا . وما نعرفه عن المادة — على ما فيه من طابع تخطيطى مجرد — يكفى من حيث المبدأ لينبئنا بالقواعد التى يحدث طبقاً لها الإدراكات الحسية والمشاعر فى نفوسنا ، وعلى هذه القواعد تتوقف الاستعمالات « العلمية » للفزياء .

والخاتمة النهائية هى أننا نعرف القليل جداً ، ومع ذلك فمن الغريب أن هذا القليل جداً كثير ، وأغرب من ذلك أن هذه المعرفة القليلة جداً يمكن أن تعطينا كل هذه القوة .

فهـــرس

صفحة